JUNI 2004 · € 6,90 (D/A)

DEUTSCHE AUSGABE DES SCIENTIFIC AMERICAN

Spektrum DER WISSENSCHAFT

www.spektrum.de

MEDIZIN

Süchtiges Gehirn

Molekularbiologen entdecken neue Ansätze zur Suchttherapie



ASTRONOMIE

Seltener Venustransit

PSYCHOLOGIE

Ursachen der Eifersucht

GEOLOGIE

Gefahr durch stille Erdbeben

D6179E
13,50 sFr/Luxemburg 8,– €
06
4 194058 406900



Reinhard Breuer
Chefredakteur

Essen wir zu viel Fleisch?

Das vorweg: Ich esse gern Fleisch, zwar nicht immer, aber doch mehrmals wöchentlich. Das hindert mich daran, zum Vegetarier zu werden. Deren typische Argumente kreisen zumeist um den Umgang mit Tieren: Keine grausame Tierhaltung, fordern sie – und jeder vernünftige Mensch wird diese Haltung billigen, wenn auch mit unterschiedlich radikalen Folgerungen für das persönliche Essen.

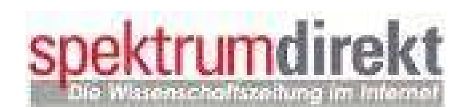
Was aber nicht nur Vegetarier, sondern erst recht Allesesser weit seltener diskutieren, sind die dramatischen Konsequenzen eines wachsenden Fleischkonsums für die weltweite Umwelt- und Ernährungssituation. Der Anstieg des globalen Fleischverzehrs wird in naher Zukunft enorme Probleme schaffen, wenn etwa im Jahre 2050 vielleicht neun Milliarden Menschen ihr nichtvegetarisches Auskommen haben wollen. Wie der Bericht »The Global Benefits of Eating Less Meat« der britischen Umweltgruppe »Compassion in World Farming« vom März darlegte, produzieren und verzehren wir so viel Fleisch, dass wir uns und unsere Umwelt damit ernstlich bedrohen (www.ciwf.co.uk).

In den letzten 50 Jahren hat sich die weltweite Fleischproduktion verfünffacht; der Bestand umfasst heute 22 Milliarden Farmtiere, darunter 15 Milliarden Hühner und 1,3 Milliarden Rinder. Bis 2050 rechnet die Lebensmittelindustrie mit einer weiteren Steigerung um 50 Prozent. Von diesem Wirtschaftszweig ist Mäßigung sicher nicht zu erwarten. Denn Nahrungsmittelkonzerne steigern ihre Umsätze, solange sie Futter an Tiere verfüttern und deren Fleisch verkaufen: ungefähr zwei Kilo Futter für ein Kilo Huhn, sieben Kilo für Rindfleisch. Die Folgen werden dramatisch sein:

Umwelt. Zusammengefasst emittieren die Nutztiere heute bereits zehn Prozent aller Treibhausgase, wobei ein Viertel davon auf das besonders wirksame Methan entfällt. Außerdem greift die Tierproduktion massiv die globalen Wasserressourcen an: 500 Liter Wasser verbraucht der Anbau eines Kilos Kartoffeln – aber ein Kilo Rindfleisch kostet rund 100 000 Liter.

Gesundheit. Weltweit leiden den Berichten nach zwar etwa 1,1 Milliarden Menschen an Untergewicht. Aber ebenso viele Menschen haben Übergewicht – eine Gruppe mit verdächtigen Wachstumsraten, und das nicht nur in den reichen Ländern, sondern auch in der Dritten Welt. Mit dem Fettverzehr erhöhen sich die Wohlstandsprobleme, beispielsweise Herz-Kreislauf-Erkrankungen oder Diabetes Typ 2, von denen es weltweit heute schon 150 Millionen geben soll. Die WHO erwartet, dass sich diese Zahl bis 2025 verdoppelt.

So weit das Problem. Was können wir dagegen tun, wie eine nachhaltige Nahrungskette durchsetzen, von der Landwirtschaft bis zum Endverbraucher? Die Effizienz im Verbrauch von Land und Wasser muss gesteigert werden, und das bedeutet vor allem reduzierten Fleischkonsum. Eine hehre Forderung, sicherlich. Aber ein »Bisschen« kann jeder beitragen, ohne dass er gleich zum radikalen Vegetarier werden muss.



PS: Vor wenigen Tagen gab es bei uns eine Premiere. »spektrumdirekt« ist da, die erste Wissenschaftszeitung im Internet unter www.spektrumdirekt.de. Wie mir mein Kollege Richard Zinken, Chefredakteur von spektrumdirekt, versichert, handelt es sich um die erste und einzige Tageszeitung in Sachen Wissenschaft.

Anzeige

JUNI 2004

SPEKTROGRAMM

FORSCHUNG AKTUELL

THEMEN

Titelbild: Weil Drogen das Lustzentrum – das Belohnungssystem des Gehirns – bedienen, brennen sie dort ihre Spuren ein *Bild: SIGANIM/Spektrum*

Die auf der Titelseite angekündigten Themen sind mit ▶ gekennzeichnet



SEITE 24

ASTRONOMIE AKTUELL

Venus vor der Sonne

Kein heute lebender Mensch hat dieses astronomische Phänomen bisher beobachten können: Am 8. Juni 2004 zieht unser innerer Nachbarplanet vor der Sonnenscheibe vorüber

SEITE 44

GEOPHYSIK

Stille Erdbeben – die unheimliche Gefahr

Nicht immer muss der Boden erzittern, wenn sich die Spannung an einer Scherzone plötzlich entlädt. Obwohl die lautlosen Beben selbst kaum Schäden anrichten, können sie riesige Flutwellen und schwere Erdstöße auslösen



Aus urheberrechtlichen Gründen können wir Ihnen die Bilder leider nicht online zeigen.

SEITE 52

PSYCHOLOGIE

Die Ursachen der Eifersucht

Sind Männer eher wegen sexueller Fehltritte eifersüchtig, Frauen dagegen wegen emotionaler Abkehr des Partners? Studien widerlegen diese Auffassung

SEITE 60

SERIE: DER BESCHLEUNIGTE KOSMOS (TEIL II)

Galaktische Wände und Blasen

Die räumliche Verteilung von Galaxien enthüllt riesige Strukturen im Kosmos. Deren Ursprung liegt in Fluktuationen der Materiedichte, die schon unmittelbar nach dem Urknall vorhanden waren

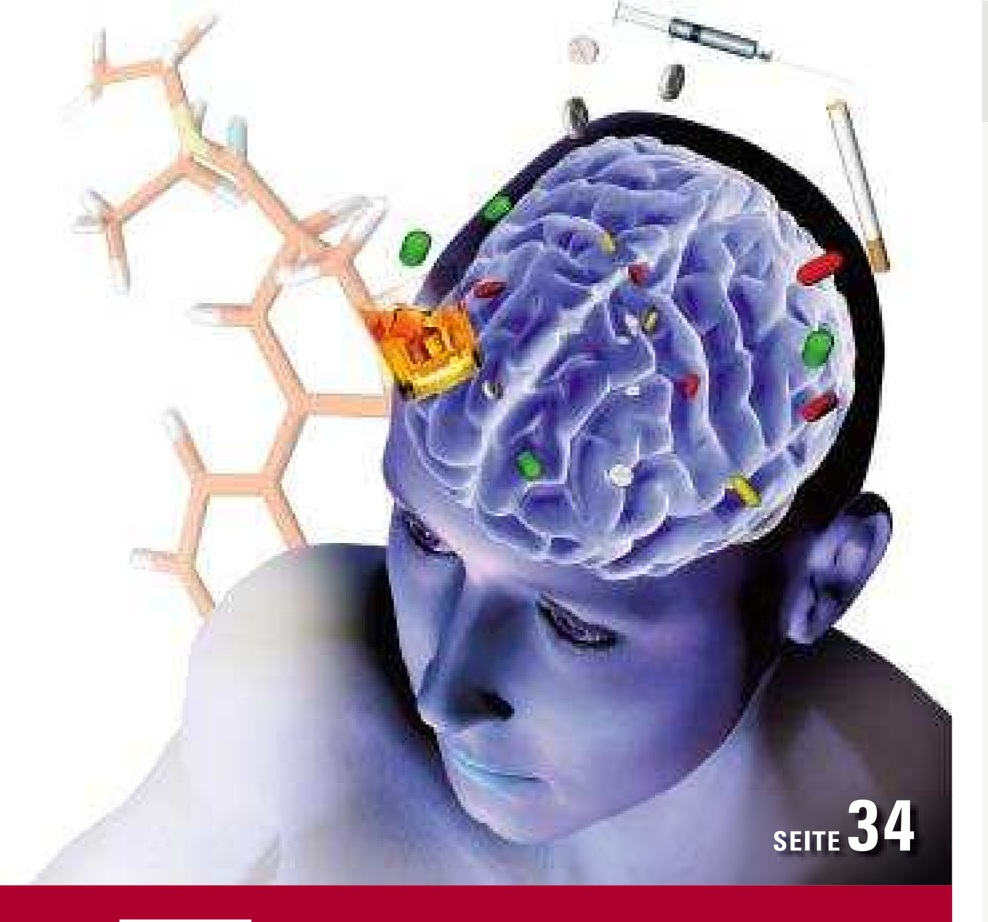
Aus urheberrechtlichen Gründen können wir Ihnen die Bilder leider nicht online zeigen.

SEITE 70

COMPUTER

Die ersten Nanochips

Wozu in die Zukunft schweifen, wenn das Gute liegt so nah? Mit viel Raffinesse haben Chipentwickler längst das Tor zur Nanowelt aufgestoßen



TITELTHEMA DROGENGEDÄCHTNIS

Das süchtige Gehirn

Das Suchtgedächtnis verschwindet mit dem körperlichen Entzug nicht. Die Erforschung der neuronalen Hintergründe könnte dazu verhelfen, diese Spuren zu tilgen – oder zumindest die Rückfallgefahr zu mindern

SEITE 76

MEDIZIN

Was kommt nach der Antibabypille?

Echte Innovationen bei der Schwangerschaftsverhütung scheitern derzeit an finanziellen, politischen und moralischen Hürden – sowie paradoxerweise an der Aids-Epidemie

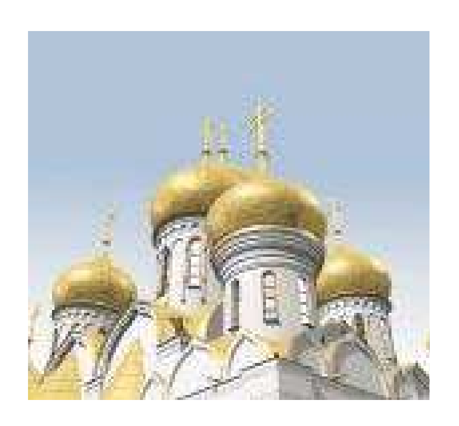
Aus urheberrechtlichen Gründen können wir Ihnen die Bilder leider nicht online zeigen.

SEITE 84

3-D-SIMULATION

Der Kreml im Wandel der Jahrhunderte

Immer wieder vernichteten Feuersbrünste das Machtzentrum Moskaus. Jetzt rekonstruierten deutsche und russische Experten seine wechselvolle Geschichte und machten fünf Bauphasen erstmals wieder begehbar – als virtuelle Realität



JUNI 2004

REZENSIONEN

PHYSIKALISCHE UNTERHALTUNGEN

KOMMENTAR

WISSENSCHAFT IM ...

WEITERE RUBRIKEN

SPEKTRUM-PLUS.DE
ZUSATZANGEBOT NUR FÜR ABONNENTEN

Aus urheberrechtlichen Gründen können wir Ihnen die Bilder leider nicht online zeigen.

Globaler Alarm

Die gefährliche Lungeninfektion Sars war nur eine Vorwarnung – jederzeit könnte eine andere neue Seuche zum globalen Ernstfall werden

ZUGÄNGLICH ÜBER WWW.SPEKTRUM-PLUS.DE NACH ANMELDUNG MIT ANGABE DER KUNDENNUMMER

Gemessen an dieser Formel haben im Vertrag von Nizza Polen und Spanien zu viele Stimmen zugesprochen bekommen, Rumänien und Deutschland (29 statt 35!) dagegen zu wenig. Die übrigen Abweichungen von der Formel halten sich in engen Grenzen.

Dr. Josef Lamprecht, Frankenthal

Wie wir lernen, die Welt zu begreifen

Februar 2004

Säugling gibt Erkennungszeichen

Das Bild auf S. 57 erinnerte mich an etwas, das ich vor mehr als 40 Jahren staunend erlebte. Mein erstes Kind, ein Junge, noch keine drei Wochen alt, lächelte seine Mutter an; ich, als junger Vater, wünschte, dass er das auch bei mir tun würde. Deshalb versuchte ich, ihn durch Gesichterschneiden zum Lachen zu bringen.

Er sah mich gespannt an, und als ich ihm die Zunge herausstreckte, tat er mit großer Konzentration das Gleiche. Wie konnte er wissen, dass er in seinem Munde etwas hatte, das dem entsprach, was er bei mir sah?

Noch erstaunlicher war, dass von dem Tage an jedes Mal, wenn ich, und nur ich, an seine Wiege trat, er als Erster die Zunge herausstreckte, sodass es zu einem Erkennungszeichen zwischen uns beiden wurde. Sprechen konnte er noch nicht, aber auf diese Weise zeigte er, dass er mich erkannte und menschlichen Kontakt mit mir suchte.

Später hat seine Mutter mit anderen Kindern Ähnliches erlebt. So klein es ist, ein Baby ist ein Mensch.

Eppo Jan Boneschanscher, Amersfoort, Niederlande

Wie die Welt richtig aussieht

In diesem Artikel ist leider etwas unberücksichtigt geblieben im Hinblick auf die Gehirnleistungen beim Sehen. Physikalisch ist das Bild des gesehenen Gegenstandes auf dem Augenhintergrund nicht nur für das Neugeborene beim ersten Öffnen der Augen, sondern auch für jeden Erwachsenen umgekehrt, verkleinert und seitenverkehrt. Das Sehzentrum des Gehirns ist mit den Zentren anderer Sinne durch Nervenbahnen verbunden.

Bei einem Test mit der Umkehrbrille (bei gesunden Erwachsenen) wird nach wenigen Wochen vom Gehirn entschieden, wie die Welt »richtig« aussieht, und die Gegenstände stehen aufrecht. Als Vergleich diente zu meiner Schulzeit die Kamera.

Dr. Cornelia Liesenfeld, Augsburg

Warum wir schlafen

Januar 2004

Gehirn und Computer

Bedeutsam fand ich die Feststellung, dass unser Gehirn die Auszeit des Körpers für Wartungsarbeiten (Reparatur und Regeneration) nutzt.

Dazu mein folgender Vergleich von Gehirn und Computer: Unsere Institutssystemcomputer laufen Tag und Nacht. Am Tag ist aktiver Institutsbetrieb, nachts kein Mensch anwesend. Die Computer beschäftigen sich – wie unser Gehirn – mit sich selbst. Sind ihre Jobs abgearbeitet, gehen sie in »Tiefschlaf« (Non-REM-Phase). Um Mitternacht starten die Systemprogramme; es beginnt der »Aktivschlaf« (REM-Phase), in dem automatisch sämtlicher angefallene Datenmüll von den Festplatten gelöscht und deren Dateistruktur optimiert, defragmentiert und (bei gefundenen Fehlern) repariert wird.

Die Gehirnevolution hat diese computertechnische Entwicklung der letzten Jahrzehnte bereits vor vielen Millionen Jahren entdeckt und gentechnisch realisiert.

Dr. Werner L. M. Zottmann, München

Briefe an die Redaktion …

… richten Sie bitte mit Ihrer vollständigen Adresse an:

Spektrum der Wissenschaft
Ursula Wessels
Postfach 10 48 40
D-69038 Heidelberg

E-Mail: wessels@spektrum.com
Fax: 06221 9126-729

Errata

Potente Zellen

Mai 2003

Das kleine eingesetzte Foto im Bild auf S. 67 zeigt keine embryonalen Stammzellen, sondern Zellen, die einem embryonalen Mäuseherz entnommen wurden.

Rechnen mit der Kurbel

April 2004

Das Foto auf S. 89 hat nicht Rick Furr, sondern Prof. Erhard Anthes 1985 bei einem Besuch von Curt Herzstark bei ihm gemacht. Red.

Spektrum DER WISSENSCHAFT

Chefredakteur: Dr. habil. Reinhard Breuer (v.i.S.d.P.)
Stellvertretende Chefredakteure: Dr. Inge Hoefer (Sonderhefte), Dr. Gerhard Trageser
Redaktion: Dr. Klaus-Dieter Linsmeier, Dr. Christoph Pöppe (Online Coordinator), Dr. Uwe Reichert, Dr. Adelheid Stahnke; E-Mail: redaktion@spektrum.com
Ständiger Mitarbeiter: Dr. Michael Springer
Schlussredaktion: Christina Peiberg (kom. Ltg.), Sigrid Spies, Katharina Werle
Bildredaktion: Alice Krüßmann (Ltg.), Anke Lingg, Gabriela Rabe
Art Direction: Karsten Kramarczik
Layout: Sibylle Franz, Oliver Gabriel, Anke Naghib, Natalie Schäfer
Redaktionsassistenz: Eva Kahlmann, Ursula Wessels
Redaktionsanschrift: Postfach 10 48 40, D-69038 Heidelberg, Tel. 06221 9126-711, Fax 06221 9126-729
Verlag: Spektrum der Wissenschaft, Verlagsgesellschaft mbH, Postfach 104840, D-69038 Heidelberg; Hausanschrift: Slevogtstraße 3–5, D-69126 Heidelberg, Tel. 06221 9126-600, Fax 06221 9126-751
Verlagsleiter: Dr. Carsten Könneker
Geschäftsleitung: Markus Bossle, Thomas Bleck
Korrespondenten: Dieter Beste, Marion Kälke, Tel. 0211 90833-57, Fax 0211 90833-58, E-Mail: Dieter.Beste@t-online.de
Herstellung: Natalie Schäfer, Tel. 06221 9126-733
Marketing: Annette Baumbusch (Ltg.), Tel. 06221 9126-741, E-Mail: marketing@spektrum.com
Einzelverkauf: Anke Walter (Ltg.), Tel. 06221 9126-744
Übersetzer: An diesem Heft wirkten mit: Dr. Bernhard Epping, Dr. Peter John, Dr. Rainer Kayser, Dr. Susanne Lipps, Dr. Markus Numberger, Dr. Frank Schubert.

Leser- und Bestellservice: Tel. 06221 9126-743, E-Mail: marketing@spektrum.com

Vertrieb und Abonnementverwaltung: Spektrum der Wissenschaft, Boschstraße 12, D-69469 Weinheim, Tel. 06201 6061-50, Fax 06201 6061-94
Bezugspreise: Einzelheft € 6,90/sFr 13,50; im Abonnement € 75,60 für 12 Hefte; für Studenten (gegen Studiennachweis) € 65,40. Die Preise beinhalten € 6,00 Versandkosten. Bei Versand ins Ausland fallen € 6,00 Porto-Mehrkosten an. Zahlung sofort nach Rechungserhalt. Konten: Deutsche Bank, Weinheim, 58 36 43 202 (BLZ 670 700 10); Postbank Karlsruhe 13 34 72 759 (BLZ 660 100 75)

Anzeigen: GWP media-marketing, Verlagsgruppe Handelsblatt GmbH; Bereichsleitung Anzeigen: Harald Wahls; Anzeigenleitung: Sibylle Roth, Tel. 0211 88723-79, Fax 0211 88723-99; verantwortlich für Anzeigen: Gerlinde Volk, Postfach 102663, D-40017 Düsseldorf, Tel. 0211 88723-76, Fax 0211 374955
Anzeigenvertretung: Berlin: Dirk Schaeffer, Friedrichstraße 150–152, D-10117 Berlin, Tel. 030 61686150, Fax 030 6159005, Telex 114810; Hamburg: Michael Scheible, Detlef Cölln, Burchardstraße 17, D-20095 Hamburg, Tel. 040 30183/-183/ -193, Fax 040 339090; Düsseldorf: Klaus-P. Barth, Werner Beyer, Kasernenstraße 67 D-40213 Düsseldorf, Postfach 102663, D-40017 Düsseldorf, Tel. 0211 301352060, Fax 0211 133974; Frankfurt: Anette Kullmann, Annelore Hehemann, Klaus Haroth, Eschersheimer Landstraße 50–54, D-60322 Frankfurt am Main, Tel. 069 242445-36, Fax 069 242445-55; Stuttgart: Norbert Niederhof, Werastraße 23, D-70182 Stuttgart, Tel. 0711 22475-40, Fax 0711 22475-49; München: Bernd Schwetje, Josephspitalstraße 15, D-80331 München, Tel. 089 545907-14, Fax 089 545907-16
Druckunterlagen an: GWP-Anzeigen, Vermerk: Spektrum der Wissenschaft, Kasernenstraße 67, D-40213 Düsseldorf, Tel. 0711 88723-87, Fax 0211 374955

Anzeigenpreise: Gültig ist die Preisliste Nr. 25 vom 01.01.2004.
Gesamtherstellung: Konradin Druck GmbH, Leinfelden-Echterdingen

ISSN 0170-2971

SCIENTIFIC AMERICAN
415 Madison Avenue, New York, NY 10017-1111
Editor in Chief: John Rennie, Publisher: Bruce Brandfon, Associate Publishers: William Sherman (Production), Lorraine Leib Terlecki (Circulation), Chairman: Rolf Grisebach, President and Chief Executive Officer: Gretchen G. Teichgraeber, Vice President: Frances Newburg, Vice President and International Manager: Dean Sanderson

SPEKTROGRAMM

GEOLOGIE

Klimaarchiv in Sibirien



Bisher lieferten vor allem Eisbohrkerne Einsichten in das einstige Klima. Doch sie reichen nur einige hunderttausend Jahre zurück. Nun haben amerikanische, deutsche und russische Geologen in den Sedimenten eines Sees im äußersten Sibirien ein Klimaarchiv entdeckt, das einen sehr viel größeren Zeitraum umfasst. Rund hundert Kilometer nördlich des Polarkreises schlug auf der Halbinsel Chukotka vor gut 3,6 Millionen Jahren ein Meteorit ein.

Er hinterließ einen zwölf Kilometer breiten Krater, der sich mit Wasser füllte. Der resultierende See mit dem zungenbrecherischen Namen El´gygytgyn scheint seither noch nie von Gletschern bedeckt gewesen zu sein. So konnte sich eine mehrere hundert Meter dicke Sedimentschicht am Boden ablagern. Sie verspricht lückenlose Einblicke in die klimatischen Verhältnisse der vergangenen 3 Millionen Jahre. Erste Probebohrungen verliefen viel versprechend. Auf einer Konferenz Ende März stellten Forscher um Martin Melles von der Universität Leipzig einen sechzehn Meter langen Bohrkern vor, der eine vollständige Sedimentationsabfolge der vergangenen 300 000 Jahre umfasst – die längste ihrer Art. An ihm lassen sich nicht nur die jüngsten Eis- und Warmzeiten detailliert ablesen; er zeigt auch plötzliche starke Klimaänderungen in der jüngeren Erdgeschichte.

(Nature, 15. 4. 2004, S. 684)

MEDIZIN

Das Altern überlisten

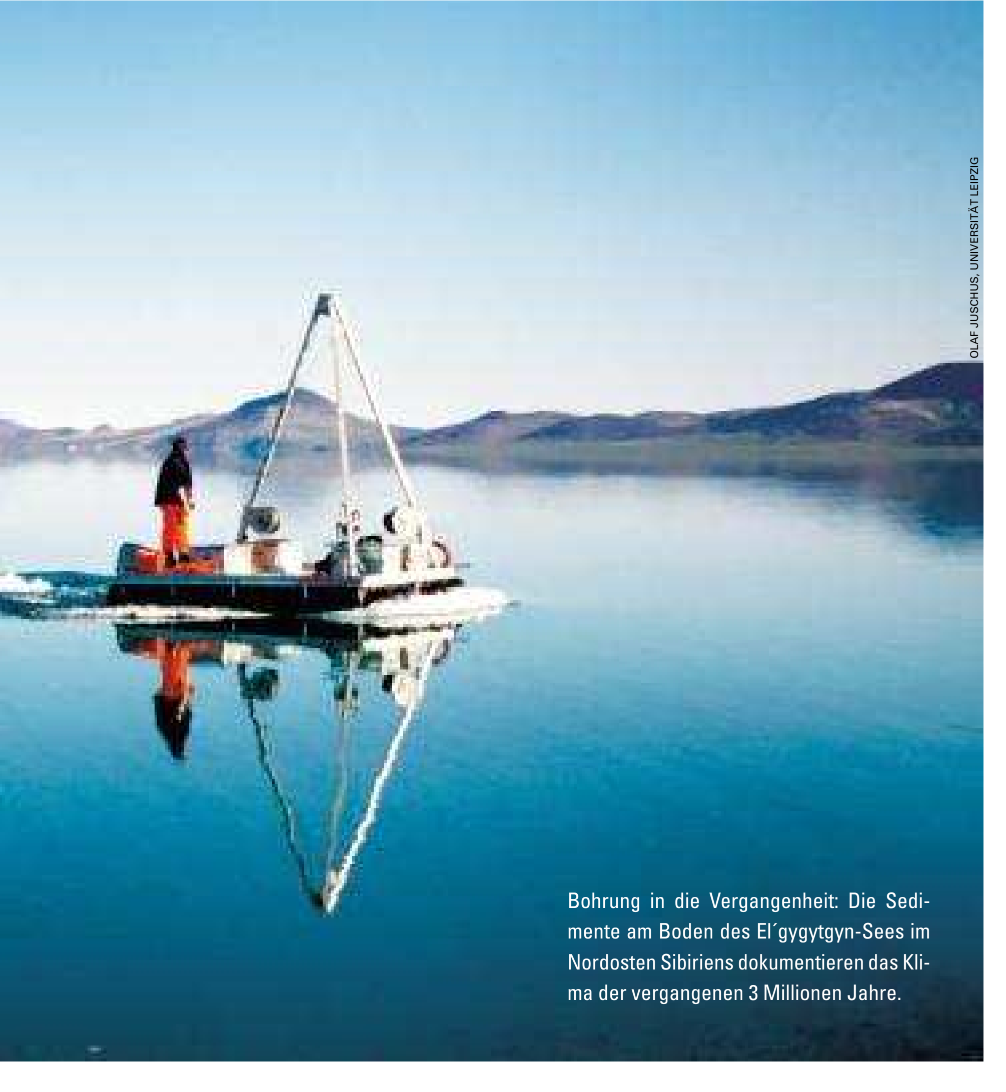
Sie hieß Yoda wie der steinalte Jedi-Meister aus der Filmtrilogie Star Wars und machte Schlagzeilen, als sie kürzlich ihren vierten Geburtstag feierte – in jugendlicher Frische, wie es hieß. Zwar verstarb die hochbetagte Jubilarin nur zwölf Tage später. Dennoch hatte die zwergwüchsige Labormaus ein biblisches Alter erreicht: Auf die menschliche Lebensspanne umgerechnet, wurde sie 136 Jahre alt. Dieses lange Leben verdankte sie einer gentechnischen Veränderung, die ihren Hormon- und Insulinhaushalt beeinflusste.

Dass Insulin beim Altern eine entscheidende Rolle spielt, ist seit längerem bekannt. Genaueren Einblick in die Zusammenhänge gewannen jetzt Biologen der Universität Freiburg bei dem winzigen Fadenwurm *Caenorhabditis elegans*, der unter anderem in Blumenerde vorkommt. In ihm entdeckten Maren Hertweck und Ralf Baumeister ein Gen, das die Alterung steuert. Es bildet ein Enzym namens SGK-1 *(serum- and glucocorticoid-regulated kinase),* das unter der Kontrolle des Insulins steht. Wird dieses Enzym ausgeschaltet, sind die Würmer weniger anfällig für Stress und leben bis zu achtmal länger, haben andererseits aber Probleme beispielsweise mit der Fortpflanzung.

Auch der Mensch besitzt ein solches Gen. Aber um einige hundert Jahre alt zu werden, müsste unsereins sich buchstäblich zu Tode fasten; denn mit jeder Nahrungsaufnahme sendet das Insulin ein Signal an die Körperzellen, das letztlich zum Altern führt.

RICHARD MILLER, UNIVERSITY OF MICHIGAN MEDICAL SCHOOL

◀ Die Zwergmaus Yoda (links) wurde dank gentechnisch verändertem Insulin-Stoffwechsel gut doppelt so alt wie ihre Artgenossen. Sie war aber zugleich sehr schwach, weshalb ein kräftiges Weibchen sie umsorgen musste.



OLAF JUSCHUS, UNIVERSITÄT LEIPZIG

Bohrung in die Vergangenheit: Die Sedimente am Boden des El´gygytgyn-Sees im Nordosten Sibiriens dokumentieren das Klima der vergangenen 3 Millionen Jahre.

ASTRONOMIE

Titan lässt die Hüllen fallen



MAX-PLANCK-INSTITUT FÜR ASTRONOMIE / ESO

▲ Oberflächenstrukturen auf Titan: Das liegende »H«, der ballspielende Hund und der Drachen sind vermutlich Seen aus flüssigem Methan.

Als einziger Mond im Sonnensystem weist Titan eine Atmosphäre auf, die der irdischen Lufthülle gleicht. Hauptanteil ist hier wie da Stickstoff, allerdings bildet Methan statt Sauerstoff die zweithäufigste Komponente. Mit dem Spectral Differential Imager (SDI) am Very Large Telescope der Europäischen Südsternwarte Eso in Chile gelang es einer internationalen Gruppe von Wissenschaftlern nun erstmals, die dichte Wolkenhülle zu durchleuchten, die bislang den Blick auf die Oberfläche des rund –175 Grad Celsius kalten Mondes verdeckte. Aus den Aufnahmen des Instruments, das in zwei unterschiedlichen Wellenlängenbereichen Strahlung registriert, rechneten die Forscher die störende Lichtstreuung der Atmosphäre heraus.

Die Bilder zeigen mehrere dunkle Strukturen. Nach Ansicht des Forscherteams, dem auch Wissenschaftler des Heidelberger Max-Planck-Instituts für Astronomie angehören, handelt es sich um Meere und Seen aus Kohlenwasserstoffen inmitten eisbedeckter Kontinente oder Hochebenen. Mit den Ozeanen auf seiner Oberfläche und dem Wetterkreislauf, der auf Methan beruht, gleicht Titan demnach als einziger Himmelskörper im Sonnensystem der Erde. Weitere Daten sind in Kürze zu erwarten, wenn die Raumsonde Cassini im Juli und Dezember dicht an dem Mond vorbeifliegt und Huygens im Januar 2005 sogar darauf landet.
(Max-Planck-Institut für Astronomie, 15.4.2004)

VERHALTEN

Und abends den Kompass stellen ...

Im Herbst und Frühjahr fliegen Zugvögel oft Tausende von Kilometern weit, um zwischen Sommer- und Winterquartier zu wechseln. Wie gelingt es ihnen, dabei Kurs zu halten? Über die Antwort haben schon Generationen von Wissenschaftlern gerätselt. Heute weiß man, dass die Tiere offenbar Sonne und Sterne zur Orientierung nutzen. Außerdem richten sie sich nach dem Erdmagnetfeld. Damit ihr Kompass aber auch immer genau stimmt, kalibrieren sie ihn offenbar täglich neu.

Das fanden Henrik Mouritsen von der Universität Oldenburg und zwei US-Kollegen nun heraus. Sie setzten Grauwangendrosseln *(Catharus minimus)* beim Sonnenuntergang einem ostwärts gerichteten, künstlichen Magnetfeld aus. Als die Vögel, die vorzugsweise nachts ziehen, schließlich aufbrachen, flogen sie daraufhin in die falsche Richtung. Doch am nächsten Abend erlangten sie ihre Orientierung wieder. Mouritsen und seine Kollegen stellten fest, dass die Eichung auf bis zu ein Grad genau ist. Nach ihrer Ansicht nutzen die Drosseln die Polarisation des Sonnenlichts während der Dämmerung. Die neue Entdeckung erklärt auch, warum Zugvögel beim Überqueren des magnetischen Äquators oder in Gegenden, wo geografischer und magnetischer Pol stark auseinander fallen, nicht die Orientierung verlieren. *(Science, 16.4.2004, S. 405)*



NASA / HENRIK MOURITSEN

Verwirrt man Drosseln abends vor ihrem Start mit einem künstlichen Magnetfeld, verlieren die Zugvögel zunächst die Orientierung (rote Linien). Doch in der nächsten Nacht fliegen sie wieder in die gleiche Richtung (gelbe Linien) wie die unbeeinflussten Tiere (schwarze Linien).



P. GÉRARD

Im Tode vereint: Skelette von Mensch und Katze in einem 9000 Jahre alten Grab auf Zypern

ARCHÄOLOGIE

Frühes Haustier

Zur Zeit der Pharaonen verehrten die Ägypter die Katze als Gottheit. Im Land am Nil vermuteten Forscher denn auch bisher den Ursprung der innigen Verbundenheit zwischen Mensch und Stubentiger. Doch offenbar reicht die Freundschaft noch viel weiter zurück als bis in die ägyptische Hochkultur vor 3000 bis 4000 Jahren.

Ein Team um Jean-Denis Vigne vom Nationalmuseum für Naturgeschichte in Paris hat jetzt in einer jungsteinzeitlichen Siedlung im Süden Zyperns ein über 9000 Jahre altes Grab entdeckt, das an der Seite eines menschlichen Skeletts die Überreste einer jungen Katze enthält. Sie scheint zeremoniell bestattet worden zu sein, worauf das unversehrte Knochengerüst hindeutet. Beide Leichen zeigen außerdem mit dem Schädel in die gleiche Richtung.

Allem Anschein nach hat hier also ein Mensch sein liebstes Haustier mit ins Grab genommen. Hundefreunde brauchen übrigens nicht eifersüchtig zu sein: Ihr Liebling lebt schon mehr als 12000 Jahren mit dem Menschen zusammen. *(Science, 9.4.2004, S. 259)*

PALÄANTHROPOLOGIE

Ältester Schmuck

Wann entwickelte der Mensch Kultur? Nach bisheriger Ansicht geschah das erst vor rund 40000 Jahren – nachdem der *Homo sapiens* sich aus seiner Urheimat Afrika auf den Weg nach Europa gemacht hatte.

Doch Christopher Henshilwood von der Universität Bergen ist anderer Ansicht. Vor zwei Jahren schon präsentierte er zwei Ockerstücke mit Ritzmustern aus der über 75000 Jahre alten Blombos-Höhle in Südafrika. Nun fand sein Team am selben Ort einen noch überzeugenderen Beleg für den Kunstsinn unserer afrikanischen Ahnen: 41 säuberlich durchbohrte Schneckenhäuschen, die wohl einmal zu Ketten aufgereiht waren. Die Datierung der Sandschicht, in der sie lagen, und einer Brandspur in der Nähe ergab ein Alter von mehr als 70000 Jahren.

Damit übertreffen die mutmaßlichen Schmuckstücke die Straußeneierschalen aus Enkapune Ya Muto in Kenia, die beiden perforierten Zähne aus dem bulgarischen Bacho Kiro und die 58 Muschelschalen aus dem türkischen Üçagizli, die bislang als frühes-te Kulturzeugnisse galten, um gut 30000 Jahre. Dass es sich nicht um eine zufällige Ansammlung von Schneckenhäuschen handelt, deren Löcher durch Abrieb entstand, belegt zum einen der Fundort: Er liegt gut zwanzig Kilometer weit entfernt vom natürlichen Lebensraum der Tiere, die zu den Reusenschnecken *(Nassarius kraussianus)* gehören. Zum anderen sind die Gehäuse alle fast gleich groß, was für eine bewusste Auswahl spricht. Überdies tragen die Innenseiten der Schalen Rückstände von Ocker, der später oft auch bei Höhlenmalereien verwendet wurde.

(Science, 16.4.2004, S. 404)

Sechs von 41 durchbohrten Schneckengehäusen aus einer über 75000 Jahre alten Höhle in Südafrika



CH. HENSHILWOOD

PHYSIK

Bohrs Traum erfüllt

Im Atommodell, das Niels Bohr 1913 formulierte, kreisen Elektronen auf elliptischen Bahnen um den Kern. Gut fünfzehn Jahre später zeigte Werner Heisenberg jedoch, dass diese Vorstellung zu einfach ist: Wegen der von ihm entdeckten Unschärferelation lassen sich Impuls und Ort quantenmechanischer Objekte niemals gleichzeitig genau bestimmen. Seither reden die Physiker von verwaschenen Orbitalen, in denen sich die Elektronen mit einer gewissen Wahrscheinlichkeit aufhalten.



CARLOS STROUD, UNIVERSITY OF ROCHESTER

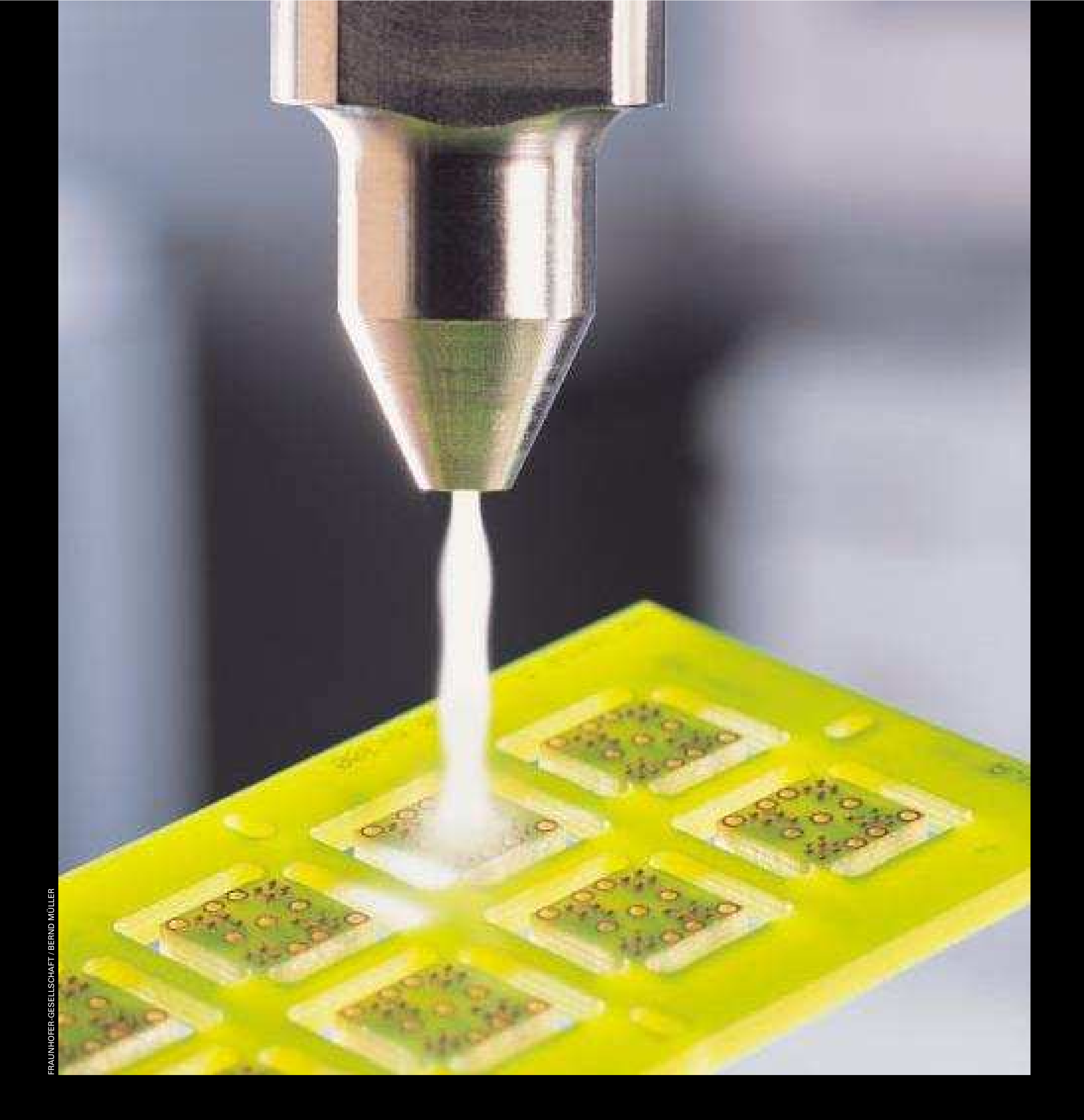
US-Physiker zwangen ein Elektron, wie in einem Karussell um den Atomkern zu kreisen.

Haruka Maeda und Thomas F. Gallagher von der Universität von Virginia in Charlottesville haben der Quantenmechanik jedoch ein Schnippchen geschlagen. Mit einem Laser bestrahlten sie ein Lithium-Atom und fingen so das äußerste Elektron in einem Wellenpaket ein. Dieses Bündel würde normalerweise innerhalb weniger Nanosekunden wieder auseinander laufen. Maeda und Gallagher versetzten es jedoch mit Mikrowellen einer Frequenz von 17,5 Gigahertz in Rotation. Auf diese Weise konnten sie es etwa 0,9 Mikrosekunden lang stabilisieren – was in der Atomphysik einer Ewigkeit gleichkommt.

Das Wellenpaket kreiste zusammen mit dem darin gefangenen Elektron also gut 15000-mal um den Atomkern – so wie Bohr sich das vor über neunzig Jahren vorgestellt hatte.

(Physical Review Letters, Bd. 92, S. 133004)

Mitarbeit: Gerhard Samulat



FRAUNHOFER-GESELLSCHAFT / BERND MÜLLER

Chipreinigung mit Trockeneis

Empfindliche elektronische Bauteile müssen sehr schonend gereinigt werden. Auf besonders effiziente, umweltfreundliche und kostengünstige Art gelingt das mit einem neuen Verfahren, das am Fraunhofer-Institut für Produktionstechnik und Automatisierung in Stuttgart entwickelt wurde. Es gleicht in gewissem Sinne dem Sandstrahlen, verwendet statt Sand jedoch Kohlendioxidschnee. Dessen Kristalle sind sehr viel kleiner und weicher. Zudem lösen sie sich am Ende buchstäblich in Luft auf: Es bleiben keinerlei Rückstände.

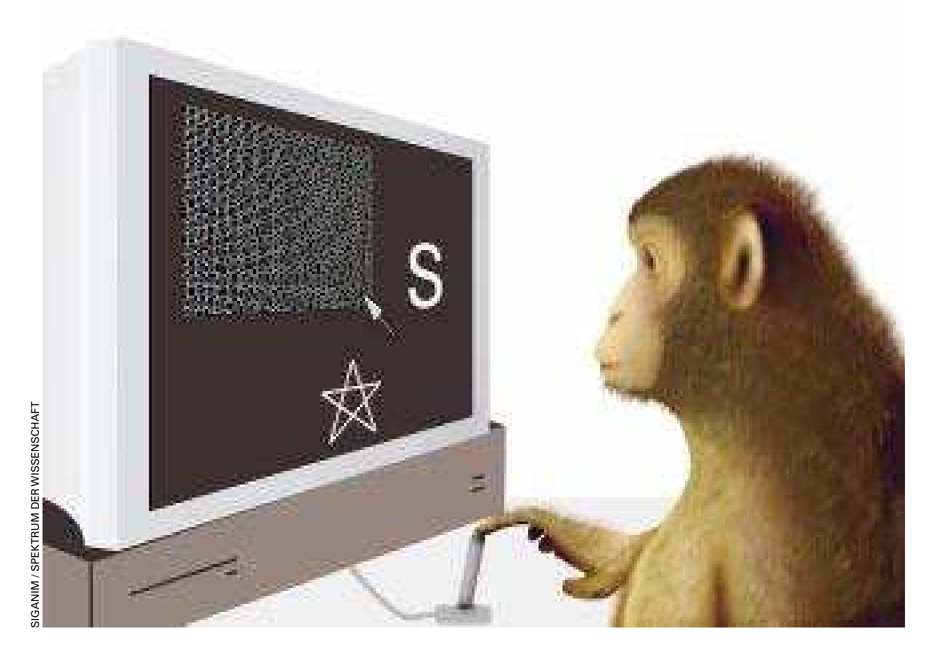
Das Know-how steckt vor allem in der Zweistoffringdüse. Durch eine Kapillare in der Mitte wird flüssiges Kohlendioxid zugeführt. Es stammt aus einer Druckflasche mit Steigrohr, in der es – ähnlich wie das Flüssiggas eines Feuerzeugs – bei Raumtemperatur unter einem Druck von 57 Bar im Gleichgewicht mit dem Gaszustand vorliegt.

Beim Austritt aus der Kapillare verdampft etwa die Hälfte der Flüssigkeit, während die andere Hälfte durch die Verdampfungskühlung zu mikrokristallinem Trockeneis erstarrt. Druckluft, die aus einem Ring um die Kapillare austritt, fokussiert den Kohlendioxidschnee und beschleunigt ihn fast auf Schallgeschwindigkeit. Auf der Chipoberfläche löst er dann störende Verunreinigungen ab.

BEWUSSTSEIN

Die Kunst des Selbstzweifels

Beim Lösen schwieriger Aufgaben werden Delfine und Rhesusaffen zuweilen unsicher – und sind sich dessen anscheinend auch bewusst. Bisher hielt man nur Menschen für fähig zu derlei Selbsterkenntnis.



SIGANIM / SPEKTRUM DER WISSENSCHAFT

Der Rhesusaffe muss entscheiden, ob das Rechteck dicht oder spärlich mit weißen Pixeln gefüllt ist, und dann mit dem Cursor auf die gepunktete Fläche oder das »S« (für spärlich) fahren. Wenn er Zweifel hat, kann er den Stern wählen. Das tat er stets dann, wenn auch ein menschlicher Proband unsicher war.

Von Frank Schubert

Keine Ahnung« – dieses Eingeständnis der eigenen Unwissenheit bekommen Lehrkräfte allzu oft zu hören. Dass ihre Schüler damit eine bedeutende geistige Leistung vollbringen, dürfte den wenigsten Pädagogen klar sein. Doch die Grenzen seines Wissens zu erkennen ist nach Meinung von Psychologen und Verhaltensforschern eine der höchsten kognitiven Fähigkeiten. Schließlich setzt sie voraus, dass man sein eigenes Denken reflektiert.

Diese »Metakognition« billigten die meisten Forscher bisher nur uns Menschen zu. Offenbar zu Unrecht – denn jetzt behaupten amerikanische Psychologen, dass auch höhere Tiere sich ihrer geistigen Unzulänglichkeit bewusst sein können (*Behavioral and Brain Sciences, Bd. 26, S. 317*). Da sie ihre Selbstzweifel aber nicht in Worte kleiden können, ist es schwierig herauszufinden, ob sie ihre Wissenslücken wirklich als solche erkennen. Die Forscher um John David Smith von der State University of New York in Buffalo mussten sich deshalb einiges einfallen lassen, um indirekt zu erschließen, was ihre tierischen Versuchsteilnehmer jeweils »dachten«.

In einem ersten Experiment spielten sie einem Delfin *(Tursiops truncatus)* nacheinander zwei Töne vor. Das Tier sollte beurteilen, ob der zweite tiefer war als der erste oder gleich hoch, und das Ergebnis seiner Abschätzung durch Drücken eines entsprechenden Knopfes kundtun. Für die richtige Antwort gab es einen Leckerbissen. Falsche Antworten hatten eine Zeitstrafe zur Folge, in der das Tier keine Versuche absolvieren und folglich auch keine Belohnung einstreichen konnte.

Im Laufe des Experiments verringerten die Forscher schrittweise den Abstand zwischen den beiden Tönen. Schließlich war er so klein, dass auch menschlichen Versuchsteilnehmern die Unterscheidung schwer fiel. Offenbar ging es dem Delfin ähnlich – er begann zu zögern, schwamm unschlüssig um die Antwortknöpfe und beäugte sie ratlos von allen Seiten. Für den menschlichen Beobachter schien seine Unsicherheit offensichtlich. Aber die Forscher wollten sie auch objektiv messen.

Zu diesem Zweck installierten sie einen dritten Knopf mit der Bedeutung »weiß nicht«. Wenn der Delfin darauf drückte, brachen sie den Versuch ab und stellten eine neue, leicht zu lösende Aufgabe (zwei deutlich verschiedene oder absolut identische Töne). Das Tier konnte mit dem Unsicherheitsknopf also vermeiden, eine falsche Antwort zu geben, und damit der gefürchteten Zeitstrafe entgehen. Das Ergebnis war eindeutig: Wenn die Töne so dicht beieinander lagen, dass sie kaum zu unterscheiden waren, antwortete der Delfin in den meisten Fällen mit »weiß nicht«.

Ein Affe im Zwiespalt

In einem zweiten Versuch testeten die Forscher Rhesusaffen *(Macaca mulatta)*. Auf einem Computerbildschirm waren ein Rechteck mit weißen Punkten, ein großes »S« und ein Stern zu sehen (Bild links). Die Tiere mussten angeben, ob das Viereck »dicht« oder »spärlich« gefüllt war – das heißt ob es 3000 Punkte enthielt oder weniger. Dazu bewegten sie per Joystick einen Cursor auf dem Bildschirm; steuerten sie das Viereck an, entsprach dies der Antwort »dicht«, wählten sie das »S«, votierten sie für »spärlich«, und bewegten sie den Cursor auf den Stern, sagten sie so viel wie »weiß nicht«. Auch hier gab es für die richtige Antwort einen Leckerbissen, für die falsche eine Zeitstrafe und für »keine Ahnung« eine neue, sehr leichte Aufgabe.

Solange die Punktezahl deutlich unter 3000 lag, wählten die Äffchen fast immer die korrekte Antwort. Doch ab 2600 Pixeln bekamen sie Probleme. Angesichts ihrer Unfähigkeit, die Dichte eindeutig zu erkennen, steuerten sie nun überwiegend den Stern an.

Damit verhielten sie sich verblüffend ähnlich wie menschliche Probanden in parallelen Versuchen. Auch diese entschieden sich ab etwa 2600 Punkten meist für den Stern. Bei der anschließenden Befragung nannten sie ihre Unsi-

cherheit als Grund. Die perfekte Analogie im Verhalten von Menschen und Rhesusaffen spricht stark dafür, dass auch die Tiere ihre Zweifel bewusst wahrnehmen.

Smith und seine Kollegen untermauerten ihre Ergebnisse durch weitere Versuchsvarianten. In einem Fall sollten die Affen die Punktezahl in zwei benachbarten Vierecken vergleichen, im anderen bestimmte Objekte wiedererkennen, die ihnen zuvor präsentiert worden waren. Hier antworteten die Tiere erwartungsgemäß umso häufiger mit »weiß nicht«, je länger die Zeitspanne zwischen Zeigen und Abfrage war.

Dass metakognitive Fähigkeiten in der Tierwelt keineswegs selbstverständlich sind, demonstrierten die Forscher anschließend mit analogen Versuchen an Ratten und Tauben. Erwartungsgemäß machten diese als weniger intelligent angesehenen Tiere nicht gezielt von der Unsicherheitsoption Gebrauch. Demnach scheinen tatsächlich nur Geschöpfe, deren so genannter Enzephalisationsquotient (abgeleitet aus dem Verhältnis zwischen Gehirn- und Körpergröße) ungewöhnlich hoch ist, auf einer geistigen Stufe mit Sokrates zu stehen, dessen berühmtes Credo lautete: »Ich weiß, dass ich nichts weiß.«

Haustierfreunde werden dem allerdings widersprechen. Schließlich erleben sie Tag für Tag, dass ihre Lieblinge sich manchmal nicht entscheiden können. Man denke nur an die alternde Katze, die zögernd abwägt, ob sie den Sprung auf den Küchentisch noch wagen kann. Allerdings verführt der enge Umgang mit einem Tier zu einer vermenschlichenden Sicht. Die kritische Frage bleibt, ob die Katze ihre Unsicherheit bewusst zur Kenntnis nimmt. Mit letzter Sicherheit werden wir das wohl nie wissen. ◁

Frank Schubert ist promovierter Biophysiker und Wissenschaftsjournalist in Berlin.

TEILCHENPHYSIK

Quarks im Fünferpack

War das erste noch seltsam, ist das zweite bereits charmant: Die Hinweise auf neuartige Teilchen aus fünf Quarks – den Grundbausteinen von Proton und Neutron – mehren sich.

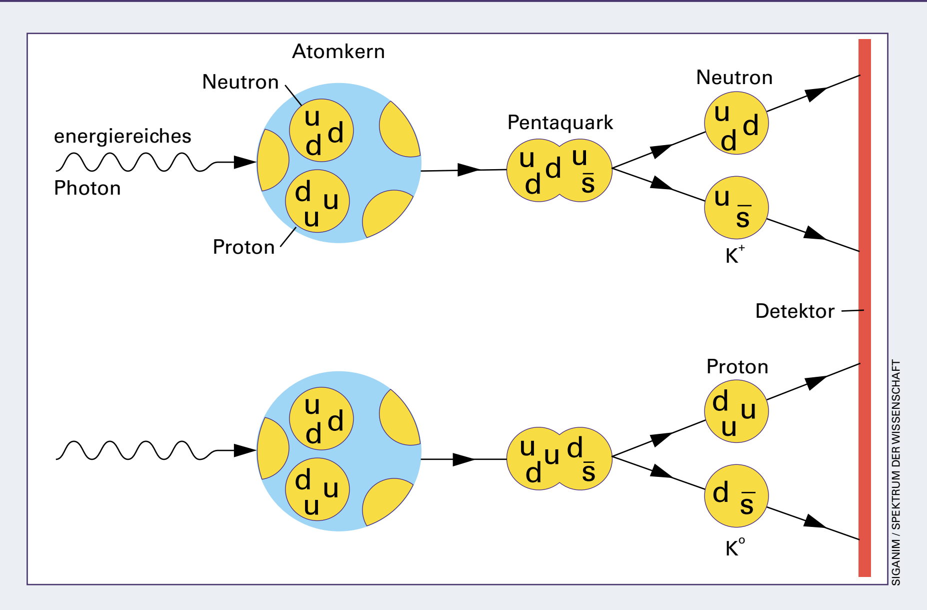
Von Olivia Meyer

Die schwersten Atomkerne enthalten über hundert Protonen und Neutronen. Deren Bestandteile, die Quarks, treten dagegen immer nur zu zweit oder dritt auf. So lautete jedenfalls bis vor kurzem die offizielle Lehrmeinung der Physik. In den letzten Jahren mehren sich indes die Stimmen der Ketzer, die auch die Existenz andersartiger Objekte für möglich halten. Schon vor einigen Jahren postulierten sie beispielsweise Teilchen, die gebundene Zustände aus fünf Quarks verkörpern – genauer gesagt, aus vier Quarks und einem Antiquark. Und jüngst erhielten die Abweichler sogar Rückhalt von ihren Kollegen an den Teilchenbeschleunigern.

Ende 2002 nämlich beobachteten die Teilnehmer des Laser-Elektron-Photon-Experiments am SPring-8-Synchrotron (Leps) in Japan erstmals einen Effekt, der sich mit der Erzeugung eines Pentaquarks (nach griechisch *penta* = fünf) erklären lässt. Eine Reihe anderer Teams in den USA, Deutschland und Russland konnte den Befund mittlerweile bestätigen. Doch damit nicht genug: Im März dieses Jahres berichtete die H1-Gruppe am Hera-Beschleuniger des Deutschen Elektron-Synchrotrons (Desy) in Hamburg über Anzeichen für ein weiteres, anders zusammengesetztes Pentaquark. Und so ▷

Indirekter Nachweis exotischer Teilchen

Beim Beschuss von Kernen mit energiereichen Photonen können sich theoretisch auch Teilchen aus fünf Quarks bilden. Sie sind allerdings zu kurzlebig, um sich direkt nachweisen zu lassen. Deshalb muss man nach ihren Zerfallsprodukten fahnden und prüfen, ob deren Energiesumme dem postulierten Wert für das Pentaquark entspricht. Im Falle des »seltsamen« Theta-Teilchens mit der Zusammensetzung »up, up, down, down, anti-strange« entstehen ein Neutron und ein positives Kaon K^+ (oben) oder ein Proton und ein neutrales Kaon K^0 (unten). Hinweise auf die Existenz dieses Pentaquarks ergaben sich inzwischen bei einem Dutzend Experimenten.



▷ ist Sein oder Nichtsein dieser exotischen Teilchen mittlerweile eine Frage, an der sich auf vielen Physiker-Kongressen hitzige Debatten entzünden. Obwohl fast monatlich neue Indizien für die Existenz der Pentaquarks gefunden werden und sich die Beweislage somit zu verdichten scheint, melden Skeptiker weiterhin Zweifel an. Ihrer Ansicht nach bedarf es weiter gehender experimenteller Untersuchungen, um zu klären, ob sich die Eigenschaften der gefundenen Teilchen wirklich in allen Punkten mit den theoretischen Erwartungen decken.

Schon in den 1960er Jahren stellten Murray Gell-Mann und George Zweig die damals kühne Hypothese auf, dass die Hadronen – Teilchen, die der starken Kraft unterliegen – aus noch kleineren Partikeln bestehen: eben den Quarks. Drei davon sollten die Baryonen bilden, zu denen die Kernteilchen gehören, und zwei – ein Quark und ein Antiquark – die Mesonen, die in der Natur zum Beispiel in der Höhenstrahlung vorkommen. Mit diesem Ansatz gelang es damals, die bis dahin gefundenen rund 200 Elementarteilchen in einem einfachen mathematischen Schema zu ordnen.

Teilchen mit Aroma und Farbe

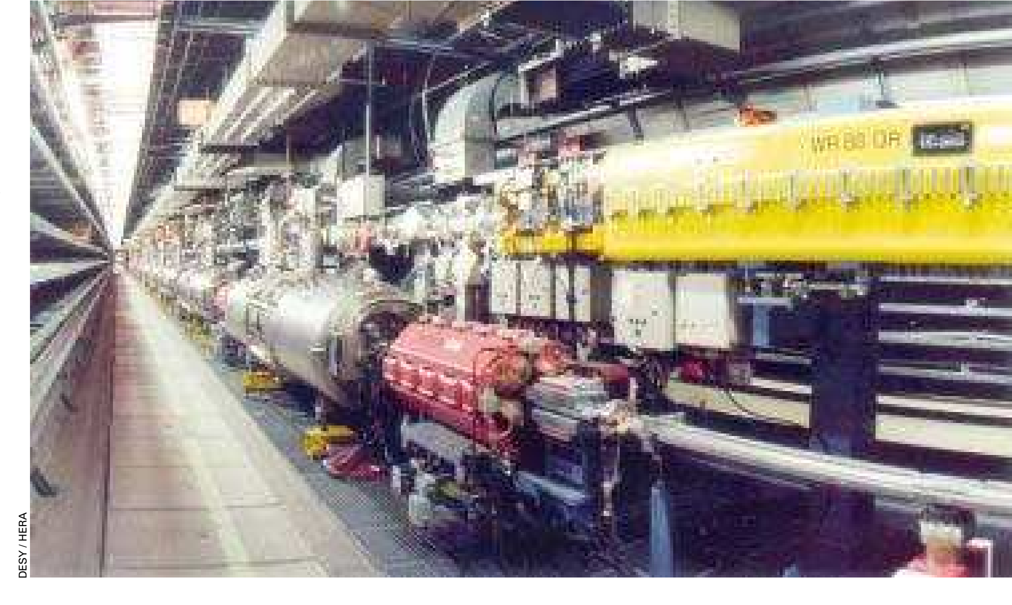
In den 1970er Jahren zeigten dann Streuexperimente, dass Protonen und Neutronen tatsächlich aus kleineren Teilchen aufgebaut sind, welche genau die Eigenschaften der von Gell-Mann beschriebenen Partikel haben. Wie man heute weiß, gibt es insgesamt sechs Typen von Quarks, die sich in einer »Flavour« (Aroma) genannten Eigenschaft unterscheiden. Die leichten up- und down-Quarks (u und d) sind Bausteine von Proton (uud) und Neutron (udd). Hinzu kommen, geordnet nach steigender Masse, das strange-, das charm-, das bottom- und das top-Quark. Sie treten allerdings nur vorübergehend in instabilen Teilchen auf.

Wie und warum haften die Quarks aneinander? Die Antwort auf diese grundlegende Frage liefert die bis in die 1970er Jahre zurückreichende Theorie der Quantenchromodynamik (QCD). Danach besitzen Quarks neben ihrem speziellen »Flavour« eine »Farbladung«, die genau drei verschiedene Werte annehmen kann. Überträger der starken Kraft sind – in Analogie zu den Photonen, welche die elektromagnetische Wechselwirkung vermitteln – so genannte Gluonen (von englisch *glue* = Leim). Diese haben selbst eine Farbladung und können deshalb – anders als Lichtquanten – auch untereinander in Wechselwirkung treten. Als Folge davon nimmt die starke Kraft, vergleichbar einer Spiralfeder, mit dem Abstand der aneinander gebundenen Quarks zu statt ab. Aus diesem Grund treten Quarks nie einzeln auf, sondern immer nur in den schon erwähnten Zweier- oder Dreiergruppen.

Die drei Farbladungen bezeichnet man analog zu den Grundfarben eines Computerbildschirms mit Rot, Grün und Blau. Und wie in der Optik entsteht ein weißer Eindruck, wenn man sie alle drei überlagert. Tatsächlich müssen nach den Regeln der QCD Hadronen grundsätzlich farblos sein. Erreichen lässt sich das durch Kombination von drei Quarks mit beliebigem Flavour, aber jeweils unterschiedlicher Farbe oder von einem Quark mit einem Antiquark der entsprechenden Komplementär- oder Antifarbe.

Soweit das bisherige Standardbild. Die Farblosigkeitsbedingung erfüllen jedoch auch bestimmte Kombinationen aus vier Quarks und einem Antiquark. Und wenn etwas theoretisch möglich ist, so das Credo der Ketzer, dann existiert es höchstwahrscheinlich auch.

Der experimentelle Nachweis solcher exotischen Teilchen gestaltet sich jedoch schwierig. Das Hauptproblem ist, dass sie bei den üblichen Detektionsmethoden in der Regel nicht klar von konventionellen Hadronen unterscheidbar sind. Eine eindeutige Identifikation gelingt nur, wenn sie eine relativ ausgefallene Zusammensetzung haben. So lässt sich zum Beispiel kein Baryon aus einem up-, down- und anti-strange-Quark konstruieren. Dagegen ist ein Fünfer-Hadron der Zusammensetzung »up, up, down, down, anti-strange« theoretisch sehr wohl möglich. Im Jahr 1997 berechneten die russischen Physiker Dmitri Diakonow, Viktor Petrow und Michail Poljakow die Eigenschaften eines solchen »seltsamen« Teilchens (englisch *strange* = seltsam), das inzwischen unter der Bezeichnung Theta bekannt ist.



DESY / HERA

Am Beschleuniger Hera des Hamburger Desy prallen Elektronen und Protonen mit hoher Energie aufeinander.

Dabei gingen sie von einem selbst entwickelten Modell für das noch immer weit gehend unbekannte Innenleben der Hadronen aus. Die anfängliche statische Sicht, wonach die Quarks als simple Bauklötze fungieren, hat sich nämlich als unzureichend herausgestellt und ist inzwischen einem dynamischeren Bild gewichen. Danach bestimmen die drei »Valenz-Quarks«, wie man heute sagt, zwar einige wichtige Eigenschaften des Teilchens wie seine elektrische Ladung, nicht aber andere Kenngrößen wie seine Masse. Außerdem sind sie keineswegs allein, sondern schwimmen gleichsam in einem »See« aus wimmelnden Gluonen und ständig neu entstehenden und wieder vergehenden Quark-Antiquark-Paaren. Nach dem Modell von Diakonow, Petrow und Poljakow ist es die Wechselwirkung mit diesem See, die den Quarks ihre »effektive« Masse verleiht, mit der sie zur Masse des Hadrons beitragen.

Herausforderung für die Experimentalphysiker

Daraus ergibt sich für das hypothetische Theta-Teilchen eine Masse von etwa 1530 Millionen Elektronenvolt. Zudem hat es nach den Berechnungen der russischen Theoretiker eine ziemlich lange Lebensdauer. Diese sollte sich gemäß

Heisenbergs Unschärferelation in einer relativ engen Massenverteilung mit einer mittleren Schwankungsbreite von weniger als 15 Millionen Elektronenvolt widerspiegeln – was die Chance erhöht, das Teilchen auch wirklich zu sehen.

Eine solch präzise Vorhersage lässt die Herzen der Experimentalphysiker höher schlagen. Deshalb machten sie sich überall in der Welt daran, die gespeicherten Ergebnisse früherer und neuer Streuversuche in diversen Teilchenbeschleunigern nach diesem neuartigen Objekt zu durchforsten. Bei solchen Experimenten werden Partikel wie Photonen, Elektronen, Neutrinos oder Protonen mit enormer Wucht auf ein so genanntes Target geschossen, das aus einem Element wie Kohlenstoff, Deuterium oder Wasserstoff besteht. Wenn die Projektile mit einem Kernteilchen in einem Target-Atom kollidieren, geben sie ihre Energie weit gehend an dieses ab. Dadurch können Quark-Antiquark-Paare aus dem »See« nun plötzlich ihrem Schattendasein entrinnen und sich materialisieren. So entstehen neue Partikel, die sich mit Detektoren nachweisen und identifizieren lassen.

Aus dem Wust an Kollisionsprodukten das ominöse Theta-Teilchen herauszufischen, gleicht allerdings der sprichwörtlichen Suche nach der Stecknadel im Heuhaufen. Zum einen wird es ohnehin nur sehr selten erzeugt, und zum anderen zerfällt es in Bruchteilen von Sekunden bereits wieder. Sein Auftreten lässt sich deshalb nur aus seinen Tochterteilchen erschließen: einem neutralen Kaon in Verbindung mit einem Proton oder einem positiv geladenen Kaon samt einem Neutron (Kaonen sind Mesonen, die ein strange-Quark enthalten).

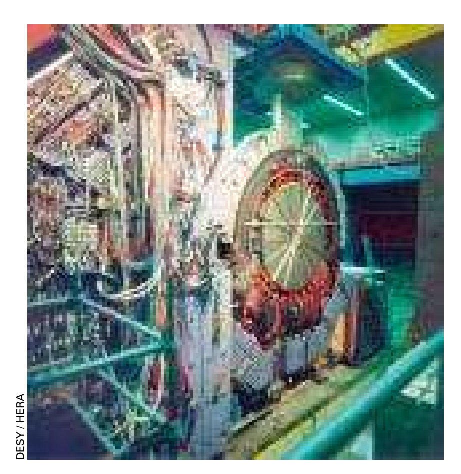
In der Regel wurden deshalb aus den Streudaten nur diejenigen Kollisionen herausgepickt, bei denen sich unter den Trümmern genau ein solches Paar befand. Aus Impuls und Energie der beiden Partikel ließ sich die Masse ihres hypothetischen Mutterteilchens berechnen. Ergab sich dabei überdurchschnittlich oft ein Wert von 1540 ± 15 Millionen Elektronenvolt, wurde dies als Indiz dafür angesehen, dass zwischenzeitlich ein Theta-Teilchen entstanden war. Die Ergebnisse dieser Analyse bei insgesamt einem Dutzend Streuexperimenten stimmen überraschend gut mit den theoretischen Vorhersagen der drei russischen Physiker überein.

Wenn es ein Theta-Teilchen mit einem anti-strange-Quark gibt, dann müsste auch eines mit anti-charm erlaubt sein. Dieser Überlegung folgend, nahmen Wissenschaftler der H1-Gruppe beim Hera-Beschleuniger (Bild) – hier prallen Elektronen und Protonen mit Energien von 27,5 beziehungsweise 920 Gigaelektronenvolt aufeinander – ihre Daten noch einmal gezielt unter die Lupe. Für die Masse eines Pentaquarks mit anti-charm gibt es bislang noch keine genaue theoretische Vorhersage. Einem intuitiven Ansatz zufolge sollte sie im Bereich von 3000 Millionen Elektronenvolt liegen. Das charmante Gegenstück des seltsamen Pentaquarks wäre elektrisch neutral und würde in ein negativ geladenes D-Meson (down, anticharm) plus Proton zerfallen.

Verdächtige Ereignisse

Diese Zerfallsprodukte bilden wieder die Signatur, nach der die Streudaten abzusuchen sind. Die Hamburger Physiker fahndeten allerdings nicht nach dem D-Meson selbst, sondern nach seinem angeregten Partner D*, der sich viel leichter identifizieren lässt. Ihre Datenanalyse ergab eine Häufung von Ereignissen, bei denen die Masse von Proton und negativ geladenem D*-Meson oder von Antiproton und positivem D*-Meson zusammen 3099 Millionen Elektronenvolt betrug. Wie beim Theta-Teilchen (1540 Millionen Elektronenvolt) ist die Massenverteilung relativ schmal. Allerdings wurde an einem anderen Hera-Detektor namens Zeus bislang kein entsprechendes Signal in den Daten gefunden.

Die ersten experimentellen Indizien für Pentaquark-Zustände setzten eine Lawine weiterer Untersuchungen in Gang. Seit der bahnbrechenden Veröffentlichung der Leps-Gruppe wurden mehr als 130 Fachartikel eingereicht, die sich mit der theoretischen Deutung der Befunde befassen. Doch vor allem auf experimenteller Seite gibt es noch eine Menge zu tun. Nur mit viel mehr Daten lässt sich die Existenz der Zustände zweifelsfrei beweisen. Im Fall des Theta-Teilchens sind daher vielerorts neue Experimente im Gang oder für die nahe Zukunft geplant. Das von der H1-Gruppe gefundene Signal wartet außerdem noch auf die unabhängige Bestätigung durch eine andere Gruppe. Mehrere Experimente bei Hera, am europäischen Forschungszentrum Cern in Genf oder ▷


DESY / HERA

Am H1-Detektor von Hera – hier beim Zusammenbau – fanden sich Hinweise auf Pentaquarks mit Charme.

▷ am Tevatron-Beschleuniger in Chicago (Illinois) bieten jedenfalls die Voraussetzungen dafür, es aufzuspüren.

Entscheidung zwischen alternativen Modellen

Besonders interessant für die Theoretiker wäre der Nachweis von »Geschwistern« des Theta-Teilchens. Dessen Bestandteile sind darin gleichsam vertauscht, sodass sich Zusammensetzungen wie »up, up, strange, strange, anti-down« oder »down, down, strange, strange, anti-up« ergeben. Außer dem Modell von Diakonow, Petrow und Poljakow existieren noch andere Vorstellungen darüber, wie sich Quarks zu einem Fünferpack zusammenfinden können. Während diese Theorien für das Theta alle dieselbe Masse von rund 1540 Millionen Elektronenvolt liefern, sagen sie für die diversen Geschwister teils stark unterschiedliche Massen voraus, sodass sich eine Entscheidung zwischen den Modellen treffen ließe.

In den 1980er und 1990er Jahren wetteiferten die Teilchenphysiker darum, in immer größeren Beschleunigeranlagen höchste Energien zu erzielen und damit in immer kleinere Dimensionen vorzustoßen. Diesem Drang sind natürliche Grenzen gesetzt – nicht zuletzt finanzieller Art. Da ist es ein Trost zu erkennen, dass auch das Studium der relativ großen Hadronen bei mittleren Energien noch überraschende Schätze zu Tage fördert, nach denen sich zu schürfen lohnt. ◁

Olivia Meyer ist promovierte Physikerin und freie Wissenschaftsjournalistin in Ratingen.

KOMMENTAR

In Deutschland daheim – in der Welt zu Hause

Lohnt sich die Verlagerung von Firmenteilen ins Ausland?

Schnell ist die Drohung ausgesprochen: Wenn sich die gesetzlichen Rahmenbedingungen in Deutschland nicht bald verbessern, verlagern wir unsere Aktivitäten ins Ausland. So rief jüngst Ludwig Georg Braun, Präsident des Deutschen Industrie- und Handelskammertags, seine Mitglieder und besonders den Mittelstand kaum verhohlen dazu auf, nicht auf eine bessere Politik zu warten, sondern lieber die Chancen der Osterweiterung »zu nutzen«. Wandert demnächst nicht nur die Produktion, sondern auch die Entwicklung und schließlich sogar die Forschung ab?

Schon heute hat Deutschland ein – wenn auch kleines – »Forschungsbilanzdefizit«. So gaben deutsche Firmen im Jahr 2001 gut 11,9 Milliarden Euro für Forschung und Entwicklung im Ausland aus, ausländische Firmen aber nur 11,5 Milliarden in Deutschland. Gleichwohl, die Bilanz ist fast ausgeglichen und verändert sich seit Jahren kaum.

Aber lohnt sich die Verlagerung von Produktion und Forschung ins Ausland wirklich? Nicht unbedingt, wenn das Hauptziel die Reduzierung der Kosten ist. So hat das Fraunhofer-Institut für Systemtechnik und Innovationsforschung ISI in Karlsruhe kürzlich herausgefunden, dass jedes dritte Unternehmen, das Firmenteile ins Ausland verbracht hatte, seine Entscheidung bereute; einige holten ihre Produktion sogar wieder nach Hause. Oft erfüllte sich die Hoffnung auf Kosteneinsparungen einfach deshalb nicht, weil die Anlaufzeiten und der Aufwand dafür, die notwendige Qualität, Flexibilität und Produktivität jenseits der Grenzen sicherzustellen, unterschätzt wurden.

Immerhin zwei Drittel der Betriebe, die Zweigstellen im Ausland unterhalten, scheinen jedoch zufrieden zu sein. Nach Analysen der Wissenschaftler verfolgen sie allerdings mehrheitlich eine andere Strategie. Bei ihnen stehen neue Märkte im Vordergrund. Diese Art von Vaterlandsflucht scheint sogar positive Rückwirkungen auf den deutschen Standort zu haben. Die Forscher nennen derartige Unternehmen »home based player«. Sie sind fest mit ihrer Heimat verwurzelt, unterhalten zugleich aber intensive Auslandsbeziehungen. Nach Angaben des Karlsruher ISI erwirtschaften sie pro Mitarbeiter sogar mehr Geld als die viel gepriesenen »global player«. Und Hochrechnungen belegen gar, dass das Auslandsengagement nicht nur heimische Arbeitsplätze sichert, sondern weitere schafft.

Auffällig ist ferner, dass es die Mehrzahl der Firmen, die erfolgreich Aktivitäten ins Ausland verlagert haben, gar nicht gen Osten zog. Ganz oben auf der Beliebtheitsskala stehen vielmehr die westeuropäischen Staaten. Das mag sich mit der Osterweiterung der Europäischen Union ändern. Es zeigt aber, dass nicht vordringlich das Lohngefälle die Unternehmer ins Ausland treibt. Wenn man ihren Aussagen, die übrigens vertraulich behandelt und anonymisiert wurden, glauben darf, dann waren es noch nicht einmal die Steuern und Abgaben in Deutschland. Im Vordergrund stand und steht vielmehr das Erschließen fremder Märkte.

Daher sollten auswanderwillige Betriebe erst einmal innehalten und genauer nachdenken, bevor sie der mehr oder weniger leicht dahingesagten Parole von DIHT-Präsident Braun folgen. In einer globalisierten Welt ist es sicherlich nicht mehr sinnvoll, Forschung und Produktion nur auf der heimischen Scholle zu praktizieren, auch wenn ein deutscher Hemdenhersteller explizit damit wirbt. Der Blick und der Gang über die Grenzen sind für eine weltoffene Nation wie Deutschland notwendig, insbesondere weil unser Land nicht über ausreichend eigene Rohstoffe verfügt. Aber der Schritt in die große, weite Welt will gut überlegt sein. Und sein Zuhause sollte man darüber nicht vergessen.

Gerhard Samulat

Der Autor ist freier Journalist für Wissenschaft und Technik in Wiesbaden.

ASTRONOMIE

Fernste Galaxie entdeckt

Mit Hilfe einer so genannten Gravitationslinse ließ sich ein Sternsystem aufspüren, das nur 460 Millionen Jahre nach dem Urknall entstand. Damit gelang ein tiefer Blick in die Kinderstube des Kosmos.

Von Georg Wolschin

Von zwei entgegengesetzten Seiten her versuchen Astronomen derzeit die Frage zu beantworten, wann sich die ersten Galaxien gebildet haben. Einerseits analysieren sie die kosmische Hintergrundstrahlung, die nur etwa 380 000 Jahre nach dem Urknall freigesetzt wurde. Damals machte die Vereinigung von Elektronen und Atomkernen zu neutralen Atomen das Universum durchsichtig, sodass es bei einer Temperatur von knapp 3000 Kelvin erstrahlte – ähnlich wie eine Glühbirne mit ihrem ebenso heißen Wolframdraht, aber natürlich viel heller.

Wegen der Expansion des Kosmos verschob sich die Wellenlänge dieser Emission allmählich in den roten Spektralbereich, während ihre Intensität zugleich stark zurückging. Heute ist nur noch ein schwaches Mikrowellen-Glimmen übrig, dessen Spektrum und räumliche Verteilung seit über zwei Jahren die Weltraumsonde WMAP *(Wilkinson Microwave Anisotropy Probe)* vermisst. Aus den Daten lässt sich indirekt auf winzige Verdichtungen im frühen Kosmos – die Keime der Urgalaxien – und die Entstehung der ersten Sterne schließen (Spektrum der Wissenschaft 5/2004, S. 46).

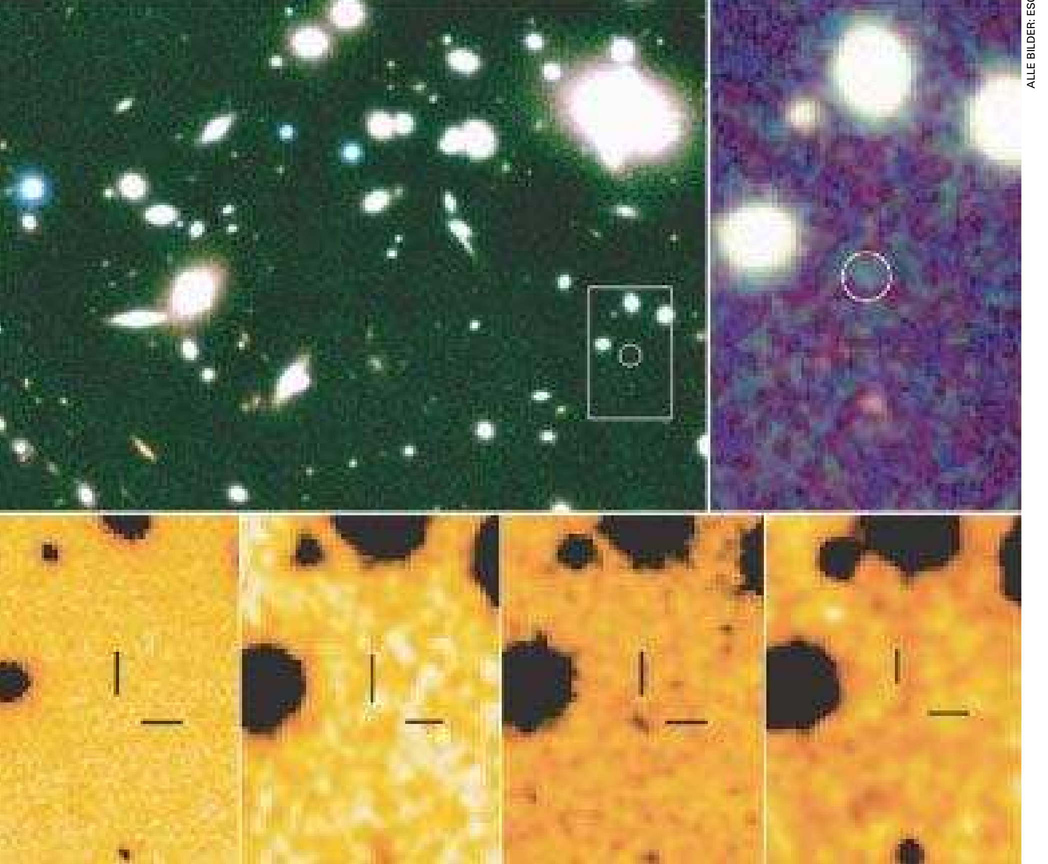
Galaxienhaufen als Gravitationslinse

Andererseits versuchen die Forscher die frühen Milchstraßensysteme mit erdgebundenen Teleskopen oder Weltraumsatelliten auch direkt zu sehen (Spektrum der Wissenschaft 9/2003, S. 10). Doch die allerersten Galaxien sind wegen der Expansion des Weltalls schon so weit von uns entfernt, dass ihr schwaches Licht nur noch mit hochempfindlichen Instrumenten und speziellen Tricks nachzuweisen ist. Außerdem wurde es auf seinem langen Weg durchs All wegen der Raumexpansion gedehnt und seine Wellenlänge wie bei der Hintergrundstrahlung in den roten Bereich des Spektrums oder jenseits davon verschoben.

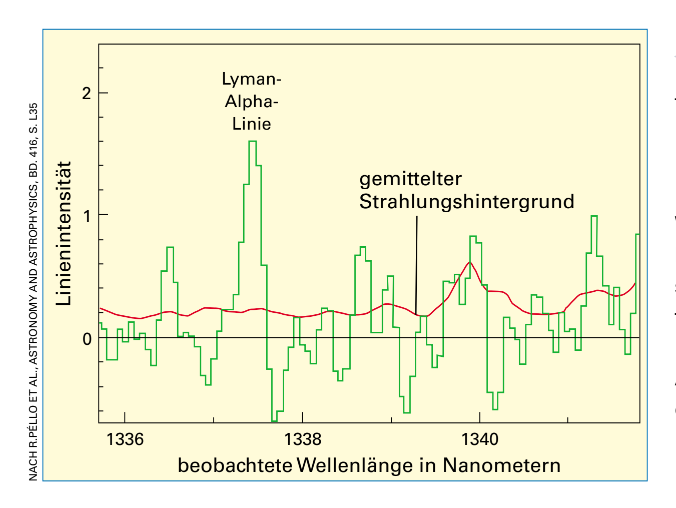
Aus dieser Rotverschiebung erschließen Astronomen, wie weit ein kosmisches Objekt von uns entfernt und wie alt es folglich ist. Ein Wert von drei entspricht beispielsweise einer Streckung der Wellenlänge auf das Vierfache, was einer Laufzeit von 11,6 Milliarden Jahren gleichkommt. Gemäß den neuesten kosmologischen Modellen, bei denen der Urknall vor 13,7 Milliarden Jahren stattfand, stammt dieses Licht also aus einer Ära, als das Universum 2,1 Milliarden Jahre alt war.

Leider klafft zwischen den Zeiträumen, welche die beiden Untersuchungsmethoden erschließen, noch eine deutliche Lücke. Die kosmische Hintergrundstrahlung macht die Grobstruktur des Universums nach dem Urknall sichtbar. Korreliert man das von WMAP gemessene Spektrum ihrer Temperaturschwankungen mit der Polarisation der Strahlung, lässt sich zudem darauf schließen, dass vor etwas über 13,5 Milliarden Jahren die ersten Sterne aufflammten; denn ihre ultraviolette Strahlung re-ionisierte die interstellare Materie und polarisierte dadurch den Strahlungshintergrund. Doch über die nachfolgenden 800 Millionen Jahre gab es bisher keinerlei Informationen. Erst rund eine Jahrmilliarde nach dem Urknall existierten jene Galaxien, deren Licht – mit einer Rotverschiebung von etwa sechs – sich gerade noch aufspüren ließ.

Jetzt aber konnten Astronomen aus Frankreich, der Schweiz und Amerika die Beobachtungslücke erheblich verkleinern. Hinter dem Galaxienhaufen Abell 1835 entdeckten sie ein Sternsystem, dessen Rotverschiebung mit einem Wert von zehn erstmals zweistellig ist. Demnach muss diese Galaxie namens IR1916 vor mindestens 13,2 Milliarden Jahren entstanden sein – nur knapp 500 Millio-


ALLE BILDER: ESO

Die Aufnahme mit dem Infrarot-Instrument Isaac am Very Large Telescope der Europäischen Südsternwarte Eso zeigt oben den Galaxienhaufen Abell 1835, der als Gravitationslinse das Licht der dahinter liegenden Galaxie IR1916 (im Rechteck) verstärkt. Wie die unteren Bilder bei verschiedenen Wellenlängen deutlich machen, erscheint die Galaxie am hellsten im infraroten (Mitte rechts) und gar nicht im sichtbaren Spektralbereich (ganz links).



Im Spektrum der Galaxie IR1916 tritt die Lyman-Alpha-Linie bei 1337,45 Nanometern auf, was einer Verschiebung der Wellenlänge auf das Elffache entspricht. Also hat das Sternsystem eine Rotverschiebung von zehn und ein Alter von 13,2 Milliarden Jahren.

nen Jahre nach dem Urknall. Das Team um Roser Péllo verwendete für seinen Nachweis das Isaac-Instrument (Infrared Spectrometer and Array Camera) an einem der vier 8,2-Meter-Spiegel des VLT (Very Large Telescope) der europäischen Südsternwarte Eso in Chile *(Astronomy and Astrophysics, Bd. 416, S. L35)*.

Außerdem setzte es gezielt den Galaxienhaufen Abell 1835 als Gravitationslinse ein, die das Licht von leuchtenden Objekten dahinter bis zu hundertfach verstärkt. In seiner Umgebung nahmen sie zunächst mit Isaac einige tausend Galaxien im nahen Infrarot auf. Danach verglichen sie die Bilder mit so genannten Deep-Field-Aufnahmen des Hubble-Weltraumteleskops von derselben Himmelsregion. Dabei sortierten sie all jene Sternsysteme aus, die auch im optischen Spektralbereich zu sehen waren; denn diese hatten eine zu geringe Rotverschiebung und mussten später als 700 Millionen Jahre nach dem Urknall entstanden sein. Übrig blieben sechs Galaxien, die als heiße Kandidaten für sehr weit entfernte und damit frühe Sternsysteme gelten konnten – eine davon war IR1916.

Um das genaue Alter dieses Objekts zu ermitteln, analysierten die Wissenschaftler sein Licht spektroskopisch. Als Bezugspunkt diente ihnen die so genannte Lyman-Alpha-Emissionslinie des neutralen Wasserstoffs. Sie liegt normalerweise bei 121,6 Nanometern und markiert den Übergang eines Elektrons aus dem ersten angeregten in den Grundzustand. Im Spektrum von IR1916 fand das Team um Péllo diese Linie nach einigen Monaten detaillierter Analyse bei 1337 Nanometern. Ihre Wellenlänge ist somit auf das Elffache gedehnt, was der erwähnten Rotverschiebung von zehn entspricht. Setzt man das Alter des Universums gleich der durchschnittlichen Lebensspanne eines Menschen von achtzig Jahren, dann zeigten die bisherigen Aufnahmen eine vierjährige Person, während auf dem neuen Bild nun ein Zweieinhalbjähriger zu bewundern ist.

Péllo und seinen Mitarbeitern gelang jedoch nicht nur ein simpler Schnappschuss, sie konnten auch weitere Informationen über IR1916 gewinnen. So schätzten sie die Sternbildungsrate ab, indem sie die Strahlung der Galaxie bei unterschiedlichen Wellenlängen und die Leuchtkraft der Lyman-Alpha-Linie analysierten. Der gefundene Wert liegt mit einigen Dutzend Sonnenmassen pro Jahr relativ hoch.

Dafür ist die Galaxie selbst noch relativ klein: Sie enthält nur etwa ein Zehntausendstel der Masse unserer Milchstraße. Auch das spricht dafür, dass es sich um ein sehr junges Sternsystem handelt – vielleicht eines der ersten überhaupt. Diese kleinen frühen Galaxien sind im Laufe der Zeit durch Zusammenstöße und Verschmelzungen schließlich auf eine Größe angewachsen, die mit derjenigen unserer Milchstraße vergleichbar ist.

Tiefer Blick mit Hubble

Nach derselben Methode wie Péllos Team hat eine andere internationale Astronomengruppe den nahen Galaxienhaufen Abell 2218 als Gravitationslinse genutzt, um mit dem Hubble-Weltraumtelskop eine dahinter liegende sehr ferne Galaxie aufzuspüren. Genauere spektroskopische Messungen mit dem Keck-Teleskop auf dem Mauna Kea (Hawaii) ergaben eine Rotverschiebung von sieben, was einem Alter von 750 Millionen Jahren entspricht. Hochrechnungen zufolge sollte es in dieser frühen Entwicklungsphase des Universums schon mindes- ▷

Auf der Suche nach dem Softron

Steven J. Wallach, einer der Hauptredner auf der Internationalen Supercomputer-Konferenz, die diesen Monat in Heidelberg stattfindet, fordert einen ganz neuen Typ von Software.

Spektrum der Wissenschaft: Sie haben sich einen Namen als Hardware-Entwickler gemacht. Warum liegt Ihnen heute die Software so am Herzen?

Steven J. Wallach: Das fragen sich meine Kollegen auch. Aber das kam zwangsläufig: Wenn deren Software meine Hardware nicht oder nicht richtig benutzen kann, dann habe ich ein Problem.

Es gibt unglaublich schnelle Prozessoren, die man zu riesengroßen Anlagen zusammenstöpseln kann. Selbst aus gewöhnlichen PCs lassen sich unglaublich leistungsfähige Cluster bauen. Mit der Zusammenschaltung von 1100 Apple-G5-Computern, die nun wirklich nicht für das Supercomputing gedacht sind, erreichte die Virginia Tech Platz 3 auf der TOP500, der Weltliste der 500 schnellsten Rechner.

Die Software-Technik hinkt da hoffnungslos hinterher. Wir programmieren immer noch genau so wie vor zwanzig Jahren.

Spektrum: Was hat die Hardware-Technik, das die Software-Technik nicht hat?

Wallach: Physikalische Gesetze! Gleichungen! Es gibt Formeln für den minimalen Zeitbedarf, für den Energieverbrauch einer logischen Operation und so weiter. Sie stammen letztlich von den Gleichungen ab, die das Verhalten von Elementarteilchen wie Proton oder Elektron beschreiben. Die Gesetze sind präzise und sehr gut verstanden. Für die Software müssen wir diesen Stand der Dinge erst noch erreichen. Wir müssen gewissermaßen das Elementarteilchen der Software finden. Ich habe es spaßeshalber »Softron« genannt.

Spektrum: Da stellt sich sofort die Frage: Wie groß ist denn die Masse des Softrons?

Wallach: Gute Frage. Aber betrachten wir erst einmal die Halbwertszeit. Nach meiner Erfahrung beträgt sie ungefähr zehn Jahre. Zur Masse fällt mir eines der vielen Augustine's laws ein: Scherzgesetze des einstigen Lockheed-Chefs Norman Augustine. Danach ist Software wie Entropie: Sie wiegt nichts, wird immer mehr, und niemand versteht sie.

Übrigens kann ich auch einige Gesetze beisteuern. So gilt die Gates'sche Unbestimmtheitsrelation: Je näher man sich beim Firmensitz von Microsoft in Redmond befindet, desto schwieriger ist es, ein Softron nachzuweisen. Oder ernsthafter: Die Zeit, die man braucht, einen Software-Fehler zu beheben, ist umgekehrt proportional der Zeit, die es kostet, ihn zu finden.

Spektrum: Aber was steckt nun wirklich hinter dem Softron?

Wallach: Ich will damit ausdrücken, dass wir mit dem Nachdenken über Software ganz von vorne anfangen müssen.

Ein Beispiel: Heute weiß kaum noch jemand, was eigentlich die Abkürzung »Fortran« bedeutet: »formula translator«. Man wollte damals nämlich nicht mehr in Maschinensprache, sondern »in der Formel« programmieren, also der Maschine die Formel geben und es ihr überlassen, damit zu tun, was sie für richtig hielt. Heute wollen wir »in der Gleichung programmieren«. Wir haben eine komplizierte Gleichung zu lösen und wollen die Einzelheiten des Lösungsvorgangs dem Computer überlassen. Programmpakete wie »Mathematica« tun das teilweise schon.

Spektrum: Das heißt, die Maschine sucht sich das Lösungsverfahren, das am besten zu ihrer Hardware passt?

Wallach: Genau. Man nennt das »adaptive computing«.

Spektrum: Aber dann würde das Problem, ein effizientes Programm zu schreiben, doch nur verlagert: vom Programmierer auf den Autor von »Mathematica« zum Beispiel. Der müsste einen sehr allgemeinen Code schreiben, der auf große Problemklassen anwendbar wäre.

Wallach: Richtig. Aber die Mühe lohnt sich. Als ich ins Hauptstudium kam, 1968, sagten alle Leute, es sei unmöglich, einen Compiler zu schreiben, der so guten Code erzeugt wie ein Programmierer, der direkt in Assembler, sprich Maschinensprache, schreibt. Schon wenig später war davon nicht mehr die Rede.

Heute halten alle das Programmieren in der Gleichung für unmöglich. Doch die schrittweise Verbesserung der Programmpakete wird das Gegenteil beweisen.

Spektrum: Ist es denn so dringend, die Bedeutung der Software-Problematik ins öffentliche Bewusstsein zu bringen?

Wallach: Dazu gibt es eine wahre Geschichte von 1980, als ich noch bei Data General war. Damals bewarb sich ein Auswanderer aus der Sowjetunion bei uns um eine Stelle. Er war promoviert und konnte einen beeindruckenden Lebenslauf vorweisen – so hatte er die Auswertungen der seismischen Bohrungen für die Ölprospektion im Kaspischen und im Schwarzen Meer geleitet.

Also fragte ich diesen offensichtlich äußerst fähigen Mann, warum seine Regierung ihn überhaupt hatte ausreisen lassen. Da lächelte er und erzählte,



Steven J. Wallach ist seit 1970 führend an der Entwicklung von Computer-Hardware beteiligt. Tracy Kidder machte ihn 1984 zu einer der Hauptfiguren in ihrem Roman »Die Seele einer neuen Maschine«. Derzeit ist er Technikvorstand der neu gegründeten Firma Chiaro Networks in Richardson (Texas), die Router der höchsten Leistungsklasse produziert.

dass ihn auf seinen Ausreiseantrag hin der zuständige Parteikommissar fragte, was er eigentlich mache. Daraufhin brachte er ein Magnetband an und sagte: ‚Alles, was ich an Arbeit geleistet habe, ist da drauf.' Da erklärte der Kommissar: ‚Wenn wirklich alles auf dieses Magnetband passt, dann kann der Mann nicht so bedeutend sein', und ließ ihn laufen.

Spektrum: Und wie steht es hier bei uns? Sind wir klüger?

Wallach: Auch in den USA, in Japan oder bei der Europäischen Union gibt es staatliches Geld nicht so leicht für eine revolutionäre Software-Neuentwicklung wie für den, der verspricht, den größten und schnellsten Computer zu bauen. Und dann wird die Geschwindigkeit des hochgelobten Superrechners nicht etwa daran gemessen, wie schnell die Kombination aus Hard- und Software ein bestimmtes Problem löst, sondern daran, wie die Hardware mit einem vorab festgelegten Stück Software – Linpack-Benchmark genannt – zu Recht kommt.

Spektrum: Gesetzt den Fall, Sie haben Ihre revolutionäre neue Software. Würden die Hardware-Hersteller ihre Maschinen daran anpassen?

Wallach: Allerdings. Genau das ist ja mit Fortran passiert. Ich selbst habe mich jahrelang damit beschäftigt, den Rechner so zu konzipieren, dass Fortran-Programme gut auf ihm laufen. Ähnliches hat sich in der jüngeren Vergangenheit mit Java abgespielt.

Spektrum: Stoßen Sie mit Ihrem Appell auf Resonanz?

Wallach: Ja. Inzwischen wollen viele Fachleute Forschung und Entwicklung auf dem Gebiet der Programmiersprachen wieder vorantreiben. Ich höre auf jeder Expertensitzung, dass der Rückstand in der Software-Entwicklung das Haupthindernis für den Fortschritt in der Computertechnik ist. Erst Mitte März hat die US-Regierung ein groß angelegtes Programm angekündigt, das die Gründung eines Software-Forschungsinstituts für Hochleistungsrechnen einschließt.

Das Interview führte **Christoph Pöppe**, Redakteur bei Spektrum der Wissenschaft.



NASA, ESA, S. BECKWITH (STSCI) UND HUDF-TEAM

Die Galaxien auf dieser Aufnahme des Weltraumteleskops Hubble könnten nur 400 bis 800 Millionen Jahre nach dem Urknall entstanden sein. Ihr genaues Alter ist aber noch nicht bestimmt.

▷ tens 400 Millionen vergleichbare Objekte gegeben haben.

Auf den Trick mit den Gravitationslinsen können die Astronomen künftig aber vielleicht verzichten. Anfang März präsentierte das Space Telescope Science Institute in Baltimore (Maryland) hoch aufgelöste Bilder des so genannten Hubble Ultra Deep Field. Die Astronomen hatten das Weltraumfernrohr auf eine Region im Sternbild Fornax (Ofen) unterhalb des Orion gerichtet und zwei unterschiedliche Kameras über mehrere Tage die an sich dunkle Stelle aufnehmen lassen: die Advanced Camera for Surveys (ACS) und die Near Infrared Camera and Multi-object Spectrometer (Nicmos).

Dabei wurden in diesem vermeintlich leeren Raumgebiet gut und gern 10000 neue Sternensysteme entdeckt, die teils nur ein Viertel so hell sind wie die lichtschwächsten Objekte auf der früheren Deep-Field-Aufnahme. Einige Dutzend davon könnten das ganz frühe Universum bevölkert haben. Durch Vergleich der optischen Bilder der ACS mit den infraroten von Nicmos identifizierten die Forscher mehrere Galaxien, die vermutlich bereits zwischen 400 und 800 Millionen Jahre nach dem Urknall entstanden sind (Bild oben). Das entspräche einer Rotverschiebung bis zwölf. Sichere Aussagen sind jedoch erst mit spektroskopischen Analysen möglich, die noch ausstehen. ◁

Georg Wolschin lehrt an der Universität Heidelberg Theoretische Physik und ist Wissenschaftsjournalist.

Venus vor der Sonne

Wenn am 8. Juni der Planet Venus in nur sechs Stunden vor der Sonnenscheibe vorüberzieht, erinnert dieses Ereignis die Wissenschaftler an eine der aufregendsten Geschichten der astronomischen Forschung.

Von Steven J. Dick

Der 8. Juni 2004 wird beginnen wie ein ganz gewöhnlicher Tag – doch in vielen Teilen der Welt werden zahllose Menschen einem außergewöhnlich seltenen Himmelsereignis entgegenfiebern. Ausgerüstet mit geeigneten Schutzfiltern vor ihren Augen, Ferngläsern oder Fernrohren können sie an diesem Tag verfolgen, wie der Planet Venus als schwarzer Fleck vor der hellen Sonnenscheibe vorüberzieht. Sechs Stunden dauert das Ereignis, das in fast ganz Asien, Afrika und Europa gut zu sehen ist. In Australien lässt sich nur der Anfang des Venusdurchgangs beobachten, dann geht die Sonne unter. In Amerika ist es gerade umgekehrt: Dort hat die Venus bereits drei Viertel ihres Weges über die Sonnenscheibe zurückgelegt, wenn diese morgens über den Horizont klettert. Im Westen Nordamerikas und im Süden Südamerikas kommt der Sonnenaufgang zu spät – der Venustransit ist bereits vorüber (Bild auf S. 30).

Ein Venusdurchgang ist zwar bei weitem nicht so spektakulär wie eine Sonnenfinsternis, bei der sich der Mond vor die Sonnenscheibe schiebt und diese für eine Weile total verdunkelt. Denn obwohl die Venus mit 12 000 Kilometer Durchmesser dreieinhalbmal so groß ist wie der Erdtrabant (und somit fast so groß wie die Erde), erscheint sie wegen ihrer viel größeren Entfernung nur als winziges Scheibchen vor der Sonne. Ihr Winkeldurchmesser beträgt mit einer Bogenminute nur ein Dreißigstel des scheinbaren Sonnendurchmessers. Was also begeistert Forscher und Hobbyastronomen so an diesem Ereignis?

Zunächst einmal ist es sehr selten: Nur fünf Venusdurchgänge konnten die Astronomen bisher beobachten, den letzten am 6. Dezember 1882. Das heißt, kein heute lebender Mensch hat dieses Phänomen jemals gesehen. Wer den Durchgang in diesem Jahr verpasst, hat 2012 eine zweite Chance – danach jedoch können erst spätere Generationen im Jahr 2117 wieder die Venus vor der Sonne vorüberziehen sehen.

Ein zweiter Grund für die Begeisterung ist die aufregende Geschichte, die mit den Beobachtungen der Venusdurchgänge im 17., 18. und 19. Jahrhundert verknüpft ist. Diese Geschichte enthält alle Zutaten eines wissenschaftlichen Thrillers: internationale Rivalitäten, mysteriöse Phänomene und umstrittene Ergebnisse. Und schließlich ist das Ereignis auch für die moderne Astronomie von Interesse, erlaubt es doch Rückschlüsse

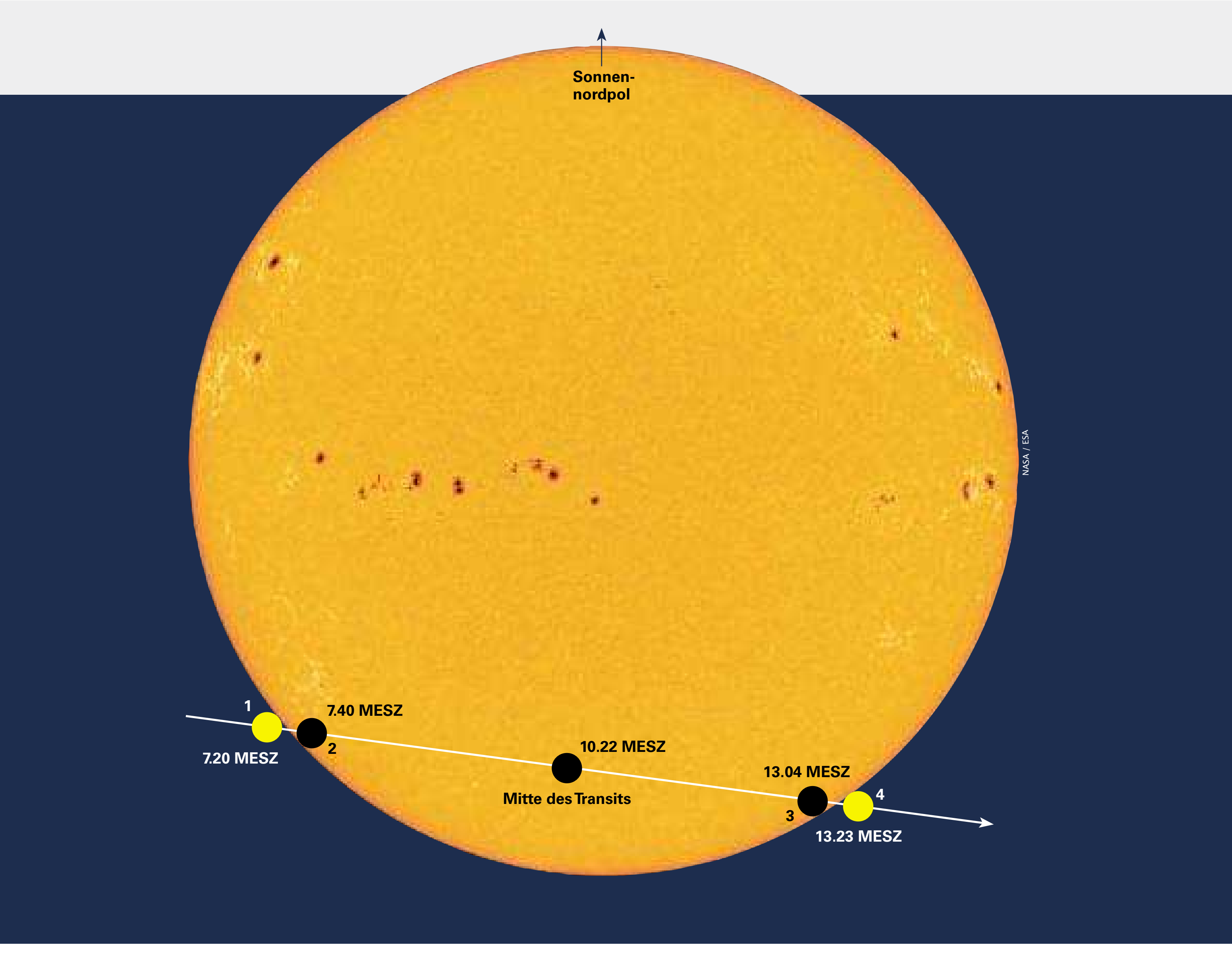
»Wir befinden uns nun am Vorabend des zweiten Durchgangs eines Paares; den nächsten wird es erst geben, wenn auf der Erde das 21. Jahrhundert angebrochen ist, wenn im Jahr 2004 die Juniblumen erblühen … Gott allein weiß, wie der Stand der Wissenschaft sein wird, wenn der nächste Durchgang stattfindet.«

William Harkness, 1882 – Astronom am U.S. Naval Observatory



SPECIAL COLLECTIONS, VASSAR COLLEGE LIBRARIES

Ein schwarzer Punkt vor der Sonne: die Venus, fotografiert während des letzten Transits 1882



auf eines der ganz aktuellen Forschungsfelder, nämlich die Suche nach Planeten in fremden Sternsystemen.

Ein Planet kann dann vor der Sonnenscheibe vorüberziehen, wenn seine Bahn die Sichtlinie des Beobachters zur Sonne kreuzt – das ist eine einfache geometrische Angelegenheit. Von der Erde aus gesehen sind also Durchgänge der beiden inneren Planeten unseres Sonnensystems, Merkur und Venus, möglich. Vom Mars aus könnte man auch Erddurchgänge beobachten – wodurch sich der Autor Arthur C. Clarke zu seiner Kurzgeschichte »Transit of Earth« inspirieren ließ, die ein solches Ereignis am 11. Mai 1984 beschreibt.

Allerdings finden Durchgänge nicht bei jedem Umlauf statt, sondern sind im Gegenteil recht selten, weil die Bahnen der Planeten gegeneinander geneigt sind. Von der Erde aus gesehen bewegen sich die Planeten deshalb nicht exakt auf der Ekliptik, der scheinbaren Bahn der Sonne. Die Bahnebene der Venus beispielsweise ist um 3,4 Grad gegen diejenige der Erde geneigt. Dadurch befindet sich der Planet, selbst wenn er in gleicher Richtung wie die Sonne steht (in Konjunktion, wie die Astronomen sagen), zu weit ober- oder unterhalb der Ekliptik und zieht an der Sonnenscheibe vorbei (obere Grafik im Kasten auf S. 27). Aus dem gleichen Grund kommt es nicht bei jedem Neumond zu einer Sonnenfinsternis – zumeist wandert der Mond ober- oder unterhalb der Sonne vorüber.

Günstige Bedingungen nur vier Mal in 243 Jahren

Zu einem Venusdurchgang kann es nur kommen, wenn Erde und Venus in Konjunktion stehen und sich zugleich beide Planeten in der Nähe eines Schnittpunkts der beiden Bahnebenen aufhalten. Das kommt in der Regel nur vier Mal in 243 Jahren vor. Die zeitlichen Abstände zwischen den Durchgängen folgen einem vorhersagbaren Muster: Nach einem ersten Transit folgt acht Jahre später ein zweiter, dann dauert es 105,5 Jahre bis zum nächsten, dem wiederum acht Jahre später ein vierter folgt; weitere 121,5 Jahre später schließlich beginnt der Zyklus von vorn.

Warum treten die Durchgänge jeweils paarweise in einem Intervall von acht Jahren auf? Die Venus läuft in 224,7 Tagen einmal um die Sonne, deshalb entsprechen 13 Venusjahre (2921 Tage) sehr genau acht Erdjahren (2922 Tage). Folglich stehen die beiden Planeten acht Jahre nach dem ersten Transit wieder fast exakt in einer Linie mit der Sonne. Der Winkeldurchmesser unseres Tages- ▷

▲ **Zwischen 7.20 Uhr (»1. Kontakt«) und 13.23 Uhr mitteleuropäischer Sommerzeit (»4. Kontakt«) wandert die Venus am 8. Juni 2004 über die Sonnenscheibe.**

▷ gestirns beträgt etwa ein halbes Grad und erlaubt so ein wenig Spielraum in den Planetenpositionen: Wenn der erste Transit nahe dem einen Rand der Sonnenscheibe stattfand, ereignet sich der nächste acht Jahre später nahe dem anderen Rand. Gelegentlich kann es allerdings passieren, dass es nur einen Durchgang statt eines Paares gibt – der zweite verfehlt dann die Sonne knapp. So gab es im 14. Jahrhundert nur einen Venusdurchgang, und auch dem Transit am 18. Dezember 3089 wird acht Jahre später kein zweiter folgen.

Pioniertaten von Kepler und Halley

Da ein Venusdurchgang mit ungeschütztem Auge kaum zu erkennen ist, ahnten die Menschen lange Zeit überhaupt nicht, dass es solche Ereignisse gibt. Der Astronom Johannes Kepler sagte im 17. Jahrhundert erstmalig Planetendurchgänge voraus. Seine so genannten Rudolfinischen Tafeln stellten die bis dahin genauesten Beschreibungen der Planetenbewegungen dar.

Kepler errechnete, dass der Merkur am 7. November 1631 die Sonnenscheibe passieren sollte, gefolgt von der Venus am 6. Dezember des gleichen Jahres. Kepler starb bereits 1630 und erlebte daher die Bestätigung seiner Vorhersagen nicht mehr. Zumindest drei Personen haben den Merkurdurchgang von 1631 aber tatsächlich beobachtet, darunter der französische Naturphilosoph Pierre Gassendi. Er hinterließ detaillierte Aufzeichnungen über das Ereignis, in denen er den scheinbaren Durchmesser des Merkurs auf 20 Bogensekunden – $^{1}/_{180}$ Grad – schätzte, eine beachtliche Leistung für die Wissenschaft der damaligen Zeit. Der Durchgang der Venus war von Europa aus nicht sichtbar, und obwohl Kepler seine Vorhersage weltweit bekannt gemacht hatte, ist keine Beobachtung des Ereignisses überliefert.

Der englische Astronom Jeremiah Horrocks (1618–1641) bemerkte, dass es am 4. Dezember 1639 zu einem weiteren Venusdurchgang kommen musste. (Als Datum gab er den 24. November 1639 an, da England erst 1752 den gregorianischen Kalender übernahm.) Er stellte ein kleines Teleskop in seinem Haus in Much Hoole nahe Liverpool auf und projizierte das Bild der Sonne auf ein Blatt Papier. Bis mittags konnte er nichts Ungewöhnliches auf dem vergrößerten Abbild der Sonnenscheibe entdecken. Widerstrebend verließ er seinen Beobachtungsposten, vermutlich um an einem Gottesdienst teilzunehmen.

Als Horrocks kurz nach drei Uhr am Nachmittag zurückkehrte, fand er die Venus bereits vor der Sonnenscheibe! Nur 30 Minuten lang konnte er den Transit beobachten, dann ging die Sonne unter. Trotzdem gelang es ihm, den Winkeldurchmesser der Venus auf rund eine Bogenminute abzuschätzen, also auf das Dreifache des von Gassendi angegebenen Merkurdurchmessers. Horrocks' Freund William Crabtree konnte das Ereignis mit einem ähnlichen Fernrohr von Manchester aus, 40 Kilometer südöstlich von Much Hoole gelegen, ebenfalls beobachten. Soweit wir wissen, waren Horrocks und Crabtree die Einzigen, die diesen Venusdurchgang wahrgenommen haben.

Zu den Venustransits in den Jahren 1761 und 1769 gab es dann bereits umfangreiche Beobachtungskampagnen. Der britische Hofastronom, der »Astronomer Royal« Edmond Halley, bekannt durch den nach ihm benannten Kometen, hatte inzwischen eine Methode entwickelt, wie man aus einem Venusdurchgang die Entfernung der Erde von der Sonne – die so genannte Astronomische Einheit – bestimmen könne. Wenn Wissenschaftler den Durchgang von zwei oder mehr Orten mit unterschiedlicher geografischer Breite beobachten, so sehen sie die Venus auf leicht verschobenen Pfaden vor der Sonnenscheibe vorüberziehen (Grafik im Kasten rechts). Die Astronomen können die Winkelverschiebung zwischen diesen Pfaden – geraden Linien auf der Sonnenscheibe – bestimmen, indem sie die zeitliche Dauer des Durchgangs messen. Diese Verschiebung – Parallaxe genannt – ist ein Maß für die Entfernung Erde-Venus, da beide Größen umgekehrt proportional zueinander sind. Das Verfahren ähnelt der bekannten Daumensprung-Methode: Wenn man seinen Daumen abwechselnd mit dem linken und dem rechten Auge betrachtet, scheint er vor dem Hintergrund hin- und herzuspringen, und zwar umso stärker, je näher man ihn vor das Gesicht hält.

Ein »schwarzer Tropfen« behindert die Messungen

Zwar gibt es 13 bis 14 Merkurdurchgänge in jedem Jahrhundert, doch bei diesen lässt sich das Halley'sche Verfahren – oder seine später von anderen Astronomen daraus entwickelten Methoden – nicht anwenden: Der Merkur ist zu weit von der Erde entfernt, um mit ausreichender Genauigkeit messbare Verschiebungen zu verursachen.

Selbst bei der näheren Venus ist das Verfahren schwierig. In der damaligen Zeit war es nicht einfach, die geografische Position der Beobachter und die Zeitpunkte der vier »Kontakte« der Venus mit dem Sonnenrand mit ausreichender Genauigkeit zu bestimmen. (Der erste Kontakt findet statt, wenn die Venus erstmals den Sonnenrand berührt, der zweite, wenn die Venus vollständig vor die Sonnenscheibe gewandert ist, der dritte, wenn die Venus den gegenüberliegenden Sonnenrand erreicht, und der vierte, wenn die Venus die Sonnenscheibe vollständig verlassen hat.)

Dennoch war die Bedeutung der Messungen enorm. Die Kepler'schen Gesetze der Planetenbewegung hatten den Astronomen bereits ermöglicht, die relativen Abstände aller Planeten von der Sonne zu berechnen, sodass sich aus der Beobachtung der Venusparallaxe die Sonnenparallaxe ermitteln ließ. Aus dieser

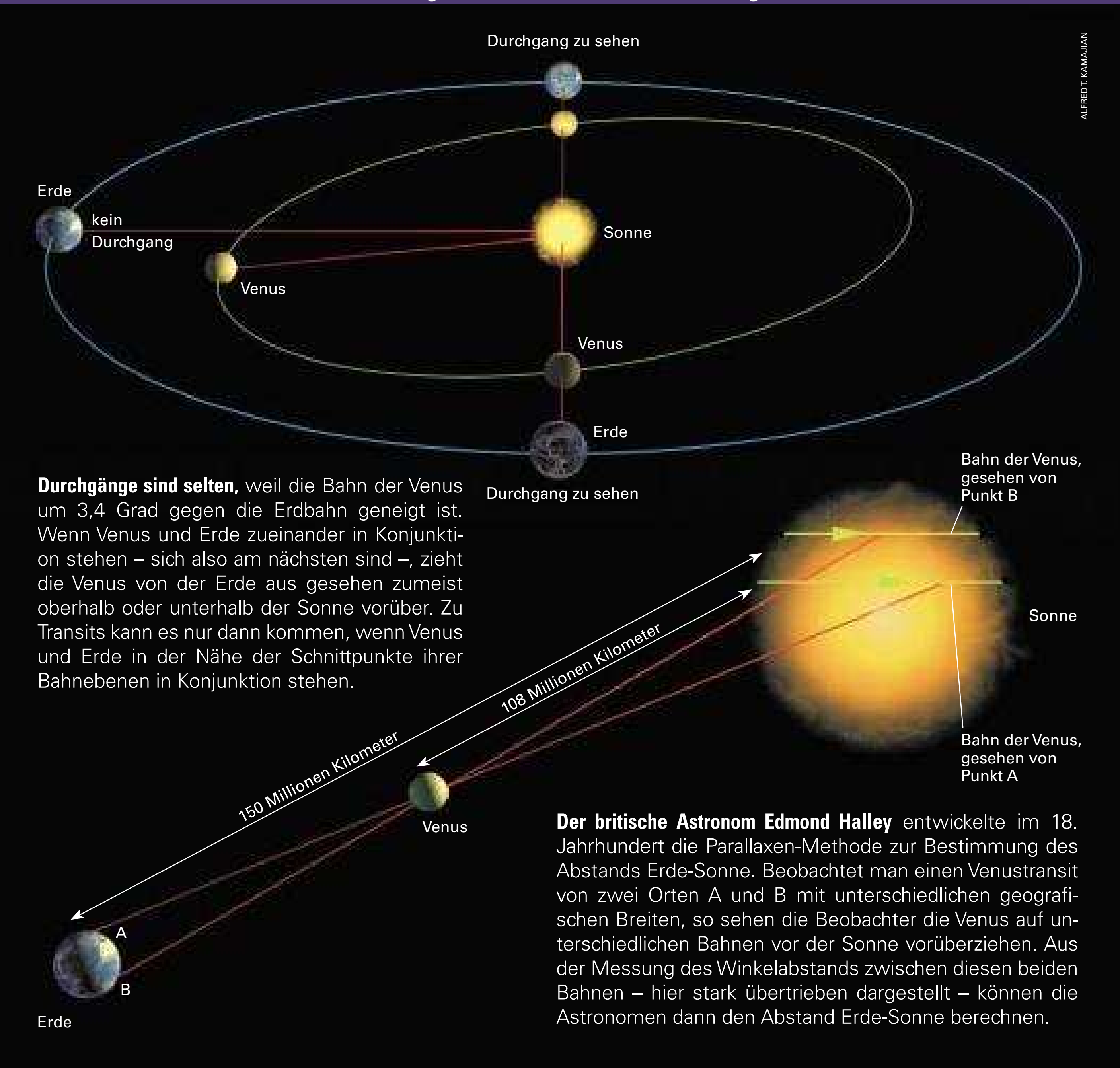
IN KÜRZE

▶ Als **Venusdurchgang oder -transit** bezeichnet man das seltene Ereignis, wenn der Planet Venus von der Erde aus gesehen vor der Sonnenscheibe vorüberzieht. Ein solches Ereignis tritt innerhalb von 243 Jahren nur viermal ein.

▶ **Seit Erfindung des Teleskops** haben die Astronomen erst fünf Venusdurchgänge beobachtet. Im 18. und 19. Jahrhundert versuchten die Wissenschaftler, mit Hilfe dieser Transits den Abstand Erde-Sonne zu bestimmen.

▶ **Sowohl professionelle als auch Amateurastronomen** warten ungeduldig auf den diesjährigen Venusdurchgang. Die Beobachtungen können den Forschern bei der Vorbereitung einer Satellitenmission helfen, die Planeten in anderen Sonnensystemen entdecken soll.

Ein Venustransit und seine geometrische Erklärung



Durchgänge sind selten, weil die Bahn der Venus um 3,4 Grad gegen die Erdbahn geneigt ist. Wenn Venus und Erde zueinander in Konjunktion stehen – sich also am nächsten sind –, zieht die Venus von der Erde aus gesehen zumeist oberhalb oder unterhalb der Sonne vorüber. Zu Transits kann es nur dann kommen, wenn Venus und Erde in der Nähe der Schnittpunkte ihrer Bahnebenen in Konjunktion stehen.

Der britische Astronom Edmond Halley entwickelte im 18. Jahrhundert die Parallaxen-Methode zur Bestimmung des Abstands Erde-Sonne. Beobachtet man einen Venustransit von zwei Orten A und B mit unterschiedlichen geografischen Breiten, so sehen die Beobachter die Venus auf unterschiedlichen Bahnen vor der Sonne vorüberziehen. Aus der Messung des Winkelabstands zwischen diesen beiden Bahnen – hier stark übertrieben dargestellt – können die Astronomen dann den Abstand Erde-Sonne berechnen.

Messung wiederum konnten die Astronomen nicht nur die Astronomische Einheit ableiten, sondern auf einen Schlag alle Entfernungen zwischen den Planeten und ihrem Zentralgestirn bestimmen.

Doch die Ergebnisse des Venusdurchgangs von 1761 waren nicht so gut wie erhofft: Die Werte für die Sonnenparallaxe schwankten zwischen 8,3 und 10,6 Bogensekunden. Der Transit von 1769 schließlich engte die Werte auf 8,43 bis 8,8 Bogensekunden ein, woraus sich für die Astronomische Einheit ein Wert zwischen 149 und 156 Millionen Kilometern ergab.

Eines der Hauptziele der ersten großen Fahrt des britischen Seefahrers James Cook mit seinem Schiff Endeavour war die Beobachtung des Venusdurchgangs vom Südpazifik aus. Cook und seine Crew führten ihre erfolgreichen Beobachtungen von einem noch heute »Point Venus« genannten Ort auf Tahiti und zwei weiteren, nahe gelegenen Orten aus. Doch Cook berichtete von einem seltsamen Problem, das auch andere Beobachter plagte: Die Ränder der Venus und der Sonne schienen bei den Kontakten für mehrere Sekunden förmlich aneinander festzukleben (siehe Bild S. 28, links) und erschwerten so eine genaue Zeitbestimmung. Cook spekulierte, das heute als »schwarzer Tropfen« bekannte Phänomen käme »durch eine Atmosphäre oder düstere Wolke um den Körper des Planeten« zu Stande.

Im Jahr 1824 analysierte der deutsche Astronom Johann Franz Encke noch einmal die Daten der beiden Durchgänge ▷

▷ des 18. Jahrhunderts und erhielt einen Wert von 8,58 Bogensekunden für die Sonnenparallaxe, entsprechend 153,3 Millionen Kilometern für die mittlere Entfernung der Sonne von der Erde. Doch 30 Jahre später argumentierte der dänische Astronom Peter Andreas Hansen auf Grundlage von Störungen der Mondbahn durch den Einfluss der Sonnenschwerkraft, die Sonne müsse erheblich näher stehen. Diese Behauptung erhielt Unterstützung, als 1862 Messungen der Parallaxe des Planeten Mars – bestimmt aus Positionsmessungen von zwei weit entfernten Orten aus – für die Astronomische Einheit Werte zwischen 146 und 149 Millionen Kilometer ergaben.

Am Vorabend der Venusdurchgänge des 19. Jahrhunderts war der Abstand Erde-Sonne also immer noch mit erheblichen Unsicherheiten behaftet. Der britische Hofastronom George B. Airy erklärte in der Mitte des 19. Jahrhunderts, die Bestimmung der Sonnenparallaxe sei »das nobelste Problem der Astronomie«.

Agnes Mary Clerke, die im 19. Jahrhundert die Geschichte der Astronomie erforschte, bezeichnete die Sonnenparallaxe als »Maßstab für das Universum … die große fundamentale Konstante der Astronomie – die Einheit des Raumes, jeder Fehler dieser Größe multipliziert und vervielfältigt sich auf tausendfache Weise, sowohl in Planeten- als auch in Sternsystemen«.

Über sechzig Expeditionen

Schon 1857 hatte Airy einen Generalplan für die Beobachtung des Venusdurchgangs von 1874 entworfen, und 1870 begann in Großbritannien der Bau der notwendigen Instrumente.
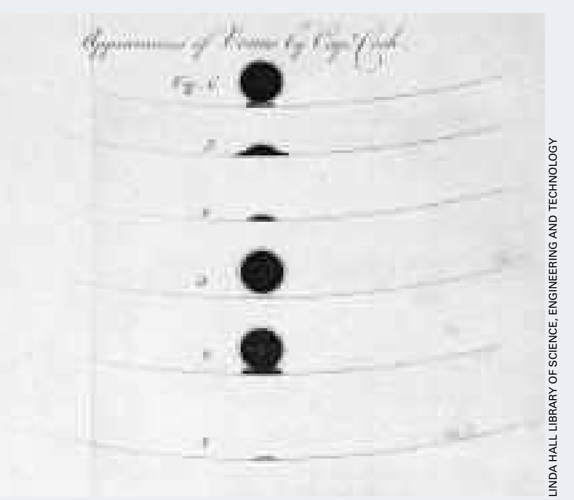
Ähnliche Pläne gab es auch in anderen Ländern: Als das sehnlichst erwartete Ereignis nahte, gab es nicht weniger als 26 russische, 12 britische, 8 amerikanische, jeweils 6 französische und deutsche sowie 3 italienische und eine holländische Expedition zur Beobachtung des Durchgangs. »Jedes Land, das eine wissenschaftliche Reputation zu wahren oder zu gewinnen hatte, beteiligte sich an dem großartigen kosmopolitischen Unternehmen des Transits«, schrieb Clerke. Man könnte dicke Bücher über die schillernde Geschichte dieser Expeditionen schreiben, denn jede war ein Abenteuer für sich – ob sie nun erfolgreich gewesen war oder nicht.

In den USA drängte Simon Newcomb vom U.S. Naval Observatory die Nationale Akademie der Wissenschaften, sich der Angelegenheit anzunehmen. Der US-Kongress setzte eine Kommission für den Venusdurchgang ein, in der Newcomb und andere Astronomen des Naval Observatory eine wichtige Rolle spielten. Die Kommission genehmigte acht Expeditionen für das Ereignis von 1874: drei auf der nördlichen, fünf auf der südlichen Halbkugel. Insgesamt stellte der Kongress dafür die stattliche Summe von 177 000 Dollar zur Verfügung – das entspricht einer heutigen Kaufkraft von über zwei Millionen Dollar.

Jede Expedition war mit hochwertigen Instrumenten ausgestattet. Für die visuelle Beobachtung der Kontaktzeiten kam ein Refraktor mit einem 12,7 Zentimeter großen Objektiv zum Einsatz, hergestellt von Alvan Clark und Söhnen, dem führenden Teleskophersteller in den USA des 19. Jahrhunderts. Zur Fotografie des Ereignisses konnten die Wissenschaftler ein erst zwei Jahrzehnte zuvor erfundenes Gerät einsetzen, einen so genannten Fotoheliografen. Bei diesem Instrument wurde das Sonnenlicht mit Hilfe eines sich langsam drehenden Spiegels, welcher der Bewegung der Sonne folgte, in ein horizontal fixiertes Fernrohr mit einer Brennweite von zwölf Metern gelenkt. Das Teleskop erzeugte ein zehn Zentimeter großes Sonnenbild und erlaubte den Astronomen so, die Bewegung der Venus über die Sonnenscheibe präzise aufzuzeichnen.

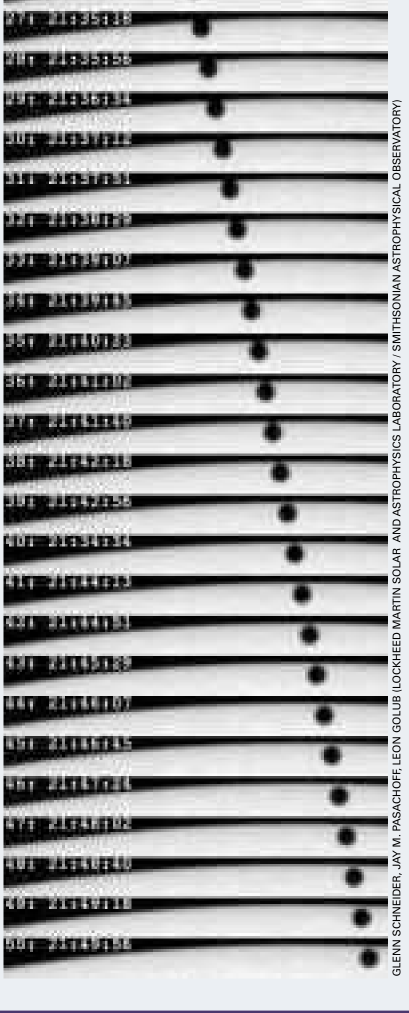
Die europäischen Expeditionen verwendeten für die Fotografie des Venusdurchgangs zumeist kleinere Teleskope mit kürzeren Brennweiten. Die Geräte waren auf qualitativ hochwertige Fotografien ausgelegt; dafür waren allerdings die Bilder kleiner als bei den Amerika-

Das Rätsel des »schwarzen Tropfens«

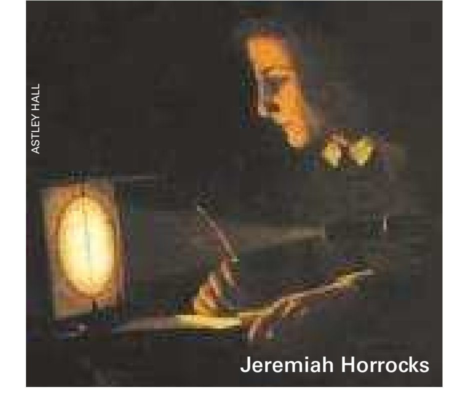


LINDA HALL LIBRARY OF SCIENCE, ENGINEERING AND TECHNOLOGY

Das merkwürdige Phänomen des schwarzen Tropfens beobachtete der britische Kapitän James Cook während des Venusdurchgangs von 1769. Die auf seinen Beobachtungen basierenden Zeichnungen (oben) zeigen, wie der Rand der Venus am Sonnenrand festzukleben scheint – dadurch war eine genaue Messung des Kontakts unmöglich. Cook spekulierte, der Effekt werde durch eine Atmosphäre der Venus verursacht. Doch 1999 konnte der »Transit Region and Coronal Explorer« (Trace) ein ähnliches Phänomen bei einem Durchgang des Merkurs aufzeichnen (rechts) – und der Merkur besitzt keine Atmosphäre. Die Ursache des Tropfenphänomens ist immer noch umstritten.



GLENN SCHNEIDER, JAY M. PASACHOFF, LEON GOLUB (LOCKHEED MARTIN SOLAR AND ASTROPHYSICS LABORATORY / SMITHSONIAN ASTROPHYSICAL OBSERVATORY)


ASTLEY HALL

Jeremiah Horrocks

wurde erklärt, man »denke nach mühsamen Maßnahmen und Berechnungen, es sei das Beste, die fotografischen Messungen im Gegensatz zu den durch direkte Beobachtungen gewonnenen nicht zu veröffentlichen«. Harkness notierte, es sei unmöglich, die Position der Venus auf der Sonne zu bestimmen, weil die Forscher auf den Fotos den Rand der Sonne nicht genau ausmachen konnten: »So scharf der Sonnenrand auf den Fotos mit dem bloßen Auge betrachtet auch wirkt, unter dem Mikroskop ist er undeutlich und schlecht zu erkennen. Und wenn man den scharfen Faden des Mikrometers über ihm platziert, verschwindet er völlig.« Nur die Franzosen veröffentlichten ihre Ergebnisse, jedoch mit großen Fehlerbalken versehen.

»Dann erblickte ich ein höchst wundervolles Schauspiel … ein Fleck ungewöhnlicher Größe und von perfekter Kreisform …«

Jeremiah Horrocks, englischer Astronom, 1639

nern, was die Messung der Venusposition schwieriger machte.

Als die Venus am 9. Dezember 1874 endlich vor die Sonne trat, behinderte schlechtes Wetter vielerorts die Beobachtungen. Und es kam noch schlimmer: Als die Astronomen die Daten der visuell ermittelten Kontaktzeiten analysierten, mussten sie feststellen, dass die Ergebnisse nicht besser waren als jene aus dem 18. Jahrhundert.

Verzweifelt gesucht – die Astronomische Einheit

Rund um die Welt, bei allen Expeditionen, zeigte sich das gleiche Problem. William Harkness vom U.S. Naval Observatory, der die Expedition nach Hobart auf Tasmanien geleitet hatte, erklärte: »Der schwarze Tropfen und die Atmosphären von Erde und Venus haben wieder eine Reihe komplizierter Phänomene hervorgerufen, die über viele Sekunden andauerten. Deshalb war es extrem schwierig, den tatsächlichen Zeitpunkt des Kontakts zu ermitteln.«

Der Züricher Astronom Rudolf Wolf bemerkt dazu in seinem vorzüglichen, 1892 erschienenen »Handbuch der Astronomie, ihrer Geschichte und Literatur«, dass »viele, wenn auch großenteils nicht sehr erfreuliche Erfahrungen gesammelt« wurden »wie zum Beispiel die, dass an demselben Orte zwei mit wesentlich gleichen Instrumenten bewaffnete Beobachter den Zeitmoment derselben Phase bis auf 10 und mehr Zeitsekunden verschieden angaben«.

Die Bedeutung der fotografischen Beobachtungen stieg also – doch auch hier gab es viele Enttäuschungen. Harkness erinnerte sich später, dass »schon bald davon geflüstert wurde, die Aufnahmen der Europäer seien komplett misslungen«. Im offiziellen britischen Bericht

Alle Hoffnungen konzentrierten sich nun auf die US-amerikanischen Expeditionen, die mit 220 verwertbaren Fotografien, gewonnen mit den Fotoheliografen langer Brennweite, zurückgekehrt waren. Erst 1881, kurz vor dem nächsten Durchgang, wurde der aus diesen Aufnahmen bestimmte Wert der Sonnenparallaxe veröffentlicht: 8,883 Bogensekunden. Doch die Ergebnisse waren derart großzügig interpretierbar, dass Newcomb und andere Astronomen den Schluss zogen, Venusdurchgänge seien nicht zur Bestimmung der Astronomischen Einheit geeignet.

Harkness hingegen verlor nicht das Vertrauen in diese Methode. Er gewann erneut die Zustimmung des US-Kongresses für acht Expeditionen, die den Venusdurchgang des Jahres 1882 beobachten sollten. Nachdem er die Fotografien dieses Transits ein Jahrzehnt lang ausgewertet hatte, gab er die Parallaxe der Sonne mit 8,809 Bogensekunden an, entsprechend einem Abstand Erde-Sonne von 149 346 000 Kilometern mit einem wahrscheinlichen Fehler von 96 000 Kilometern. Heute wissen wir aus genauen Messungen mit Hilfe von Raumsonden, dass die Astronomische Einheit 149 597 870 Kilometer beträgt. Das entspricht einer Sonnenparallaxe von 8,794148 Bogensekunden.

Wie wichtig waren die Venusdurchgänge für die Geschichte der Astrono- ▷

mie? Newcomb verwendete in seinem System astronomischer Konstanten, das bis weit ins 20. Jahrhundert hinein international benutzt wurde, zwar einen Wert für die Sonnenparallaxe, der sich kaum von dem Wert von Harkness unterschied. Doch bei der Bestimmung dieser Größe hatte er den Venusdurchgängen im Vergleich zu anderen Methoden nur ein geringes Gewicht beigemessen. Seiner Meinung nach verhinderten das Tropfenphänomen und andere Fehlerquellen die Nutzung der Durchgänge zur Bestimmung der Astronomischen Einheit.

Die Ursache des schwarzen Tropfens ist übrigens noch heute nicht restlos aufgeklärt. Die Astronomen des 18. und 19. Jahrhunderts zogen eine Vielzahl unterschiedlicher Erklärungen in Erwägung, darunter die Atmosphären der Venus und der Erde. Doch als die Forscher 1999 den Satelliten Trace (Transition Region and Coronal Explorer) nutzten, um einen Durchgang des Planeten Merkur zu beobachten, der keine Atmosphäre aufweist, sahen sie auch in diesem Fall ein schwaches Tropfenphänomen (siehe Bild auf S. 28, rechts). Diese Beobachtung, die durch keinerlei atmosphärische Effekte beeinflusst worden sein konnte, zeigt, dass die eigentliche Ursache woanders liegen muss.

Das Trace-Team kam zu dem Schluss, das Phänomen entstehe zumindest teilweise durch eine optische Verschmierung zwischen Planeten- und Sonnenscheibe. Ein ähnlicher Effekt lässt sich beobachten, wenn man Daumen und Zeigefinger sehr nahe zusammen hält und die kleine Lücke zwischen ihnen gegen einen hellen Hintergrund betrachtet: Zwischen ihnen bildet sich eine dunkle »Brücke«, selbst wenn sich die Finger nicht berühren.

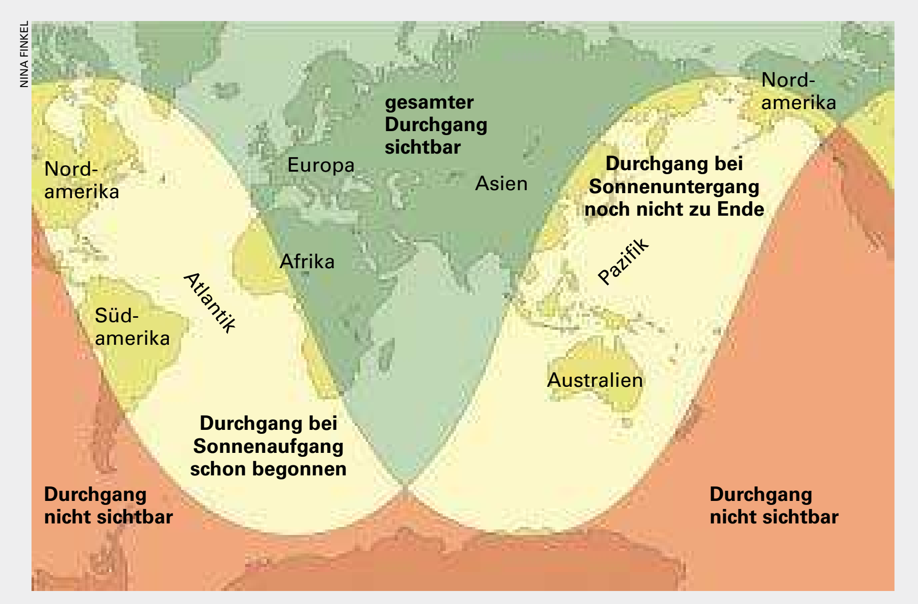
Bei den Planetendurchgängen verstärkt vermutlich die Randverdunkelung der Sonne – also die Abnahme ihrer Helligkeit vom Zentrum zum Rand hin – dieses Phänomen.

Ein Festtag für die Astronomie

Wenngleich Venusdurchgänge heute keine Bedeutung mehr für die Bestimmung der Astronomischen Einheit haben, dürfte der Transit am 8. Juni 2004 doch zu den meistbeobachteten astronomischen Ereignissen der Geschichte gehören. Selbst ohne Hilfsmittel sollte die Venus vor der Sonnenscheibe zu erkennen sein, erst recht mit einem kleinen Fernglas oder Teleskop. Doch keinesfalls darf man ohne Schutzmaßnahme direkt in die Sonne blicken. Es müssen die gleichen Vorsichtsmaßnahmen wie bei einer Sonnenfinsternis getroffen werden. Wer ohne einen geeigneten Filter mit einem Teleskop direkt in die Sonne schaut, riskiert eine sofortige Schädigung des Auges und dauerhafte Erblindung.

Am sichersten ist es, wenn man zur Beobachtung des Transits das Bild der Sonne auf eine weiße Fläche wie etwa ein Blatt Papier oder ein Stück Karton projiziert. Erfahrene Amateurastronomen, die akkurat die Kontaktzeiten ermitteln, können wertvolle Beiträge für die Forschung leisten. Ihre Messergebnisse können sie – zusammen mit den geografischen Koordinaten ihres Beobachtungsorts – an die großen amateurastronomischen Vereinigungen, die nationalen astronomischen Gesellschaften oder die nationalen Koordinationsstellen für den diesjährigen Venustransit senden. In Deutschland ist dies vor allem das Kiepenheuer-Institut für Sonnenphysik in Freiburg, das Informationen und Veranstaltungen zum Venustransit koordiniert (Internetadresse: www.kis.uni-freiburg.de/vt-2004/).

Venustransit 2004: Sichtbarkeit und Sicherheit



Der Venusdurchgang am 8. Juni 2004 ist am besten von Europa, Afrika und Asien aus zu sehen. Beobachter in Australien und Amerika können nur Teile des Durchgangs verfolgen.



Damit die Augen nicht geschädigt werden, müssen bei der Beobachtung des Transits – wie bei einer Sonnenfinsternis – geeignete Filter verwendet werden, um das Sonnenlicht zu dämpfen. Hinweise für sicheres Beobachten finden sich zum Beispiel auf der Website des Kiepenheuer-Instituts für Sonnenphysik www.kis.uni-freiburg.de/vt-2004/.

Venustransit mit Folgen

Warum die Stadt Mannheim im 18. Jahrhundert eine Sternwarte bekam, aber noch Jahrzehnte auf eine verbesserte Trinkwasserversorgung warten musste

Der Grundstein der astronomischen Forschung im Rhein-Neckar-Raum wurde 1751 durch die Berufung des Jesuitenpaters Christian Mayer (1719–1783) an die Universität Heidelberg gelegt. Im Folgejahr übernahm Mayer den Lehrstuhl für Experimentalphysik, den der Kurfürst Carl Theodor von der Pfalz (1724–1799) neu eingerichtet hatte.

Als Naturwissenschaftler schien Mayer auch bestens geeignet, ein drängendes Problem in Angriff zu nehmen: die unsäglichen Trinkwasserverhältnisse der kurfürstlichen Residenzstadt Mannheim zu verbessern. So erhielt er 1757 den Auftrag, die damals als vorbildlich geltende Wasserversorgung in Paris zu studieren.

In der französischen Hauptstadt besichtigte Mayer nicht nur sämtliche Wasserwerke und das Leitungsnetz, sondern verkehrte auch intensiv mit einigen der führenden Astronomen jener Zeit: Nicolas-Louis de Lacaille (1713–1762), der vom Kap der Guten Hoffnung aus die Sterne des Südhimmels katalogisiert hatte, Joseph-Jérôme de Lalande (1732–1808), dem zusammen mit Lacaille die Bestimmung der Mondparallaxe gelungen war, César François Cassini de Thury (1714–1784), dem Direktor des Pariser Observatoriums, sowie Pierre Bouguer (1698–1758), einem der Begründer der wissenschaftlichen Fotometrie.

Von ihnen erfuhr Mayer auch, dass die Venus am 6. Juni 1761 vor der Sonnenscheibe vorüberziehen würde und wie wichtig es sei, dieses seltene Ereignis zu beobachten.

Nach seiner Rückkehr vermochte Mayer die Unterstützung Carl Theodors für dieses Vorhaben zu gewinnen. Der Kurfürst ließ im Garten des Schwetzinger Schlosses, seiner Sommerresidenz, einen Holzbau errichten, in dem die eigens angeschafften Beobachtungsinstrumente untergebracht wurden. Wenige Wochen nach dem beobachteten Transit wurde der Bau eines kleinen Turms auf dem Dach des Schwetzinger Schlosses begonnen, der als Sternwarte diente. Die Beobachtungsverhältnisse dort waren jedoch sehr beengt, und auf Mayers Rat ließ der Kurfürst in Mannheim einen größeren Sternwartenturm erbauen, den er mit den damals modernsten Instrumenten ausstattete: unter anderem mit einem achtfüßigen Mauerquadranten, einem Zenitsektor, einem Passageinstrument und zwei Fernrohren von acht beziehungsweise zehn Fuß Länge. Diese Ausrüstung konnte sich mit der anderer großer Observatorien in Europa messen.

Anfang 1775 bezog Mayer – inzwischen zum Kurfürstlichen Hofastronomen ernannt – das Sternwartengebäude. Er war ein eifriger und ausdauernder Beobachter, der sich auch international großes Renommee erwarb.

Mit dem Mauerquadranten gelang ihm die Entdeckung zahlreicher Doppelsterne, die er »Fixsterntrabanten« nannte. Damals war die Natur dieser Doppelsysteme noch unbekannt, aber Mayer schloss aus der auffälligen engen Nachbarschaft jeweils zweier Sterne am Himmel, dass sie physisch zusammengehören. Damit verließ Mayer als einer der Ersten das klassische Gebiet der Astronomie, das damals im Wesentlichen Positionsmessungen umfasste, und drang ansatzweise in die Stellarastronomie vor. Bis 1781 waren 79 solcher Sternpaare bekannt, von denen Mayer allein 72 entdeckt hatte. Doch der Nachweis, dass es sich tatsächlich um Doppelsterne handelte, blieb Friedrich Wilhelm Herschel (1738–1822) vorbehalten, der 1803 am Sternsystem Castor in den Zwillingen die Bewegung der Komponenten um einen gemeinsamen Schwerpunkt nachweisen konnte.

Und die Mannheimer Wasserversorgung? Mayers Denkschrift dazu enthielt zwar Pläne und Kostenvoranschläge, war aber ermüdend weitschweifig. Eifersüchteleien und Zwistigkeiten zwischen Planern, Baufachleuten und Regierungsbeamten führten dazu, dass Mannheim noch mehrere Jahrzehnte auf eine Wasserleitung warten musste.

Uwe Reichert

Der Autor ist promovierter Physiker und Redakteur bei Spektrum der Wissenschaft.

▷ Die Astronomische Gesellschaft von Kanada hat eine Liste veröffentlicht, in der für den 8. Juni der mittlere Bewölkungsgrad für viele Orte rund um den Globus verzeichnet ist. Demnach befinden sich die besten Beobachtungsplätze


U.S. NAVAL OBSERVATORY LIBRARY

William Harkness

im Irak, in Saudi-Arabien und in Ägypten. Das absolute Optimum findet sich im ägyptischen Luxor: Dort beträgt, basierend auf den historischen Aufzeichnungen, die Wahrscheinlichkeit für einen wolkenfreien Blick 94 Prozent.

Venusdurchgänge haben in der Vergangenheit die astronomische Forschung beflügelt und überhaupt viele Wissenschaftler zu Astronomen werden lassen. In Deutschland wurde zum Beispiel der Jesuitenpater Christian Mayer, der den ersten Lehrstuhl für Experimentalphysik an der Universität Heidelberg innehatte, durch den Venustransit des Jahres 1761 zum angesehenen Astronomen (siehe Kasten auf S. 31). Der Venusdurchgang von 1882 weckte bei George Ellery Hale und Henry Norris Russell das Interesse am Himmelsgeschehen – aus ihnen wurden schließlich zwei der größten Astronomen des 20. Jahrhunderts.

Vielleicht wecken die Venusdurchgänge des 21. Jahrhunderts ebenfalls bei vielen jungen Leuten das Interesse an der Astronomie. Weltweit nutzen Forschungs- und Bildungseinrichtungen die günstige Gelegenheit und unterstützen eine Vielzahl von Veranstaltungen, die sich an Schüler, Studenten und auch an die breite Öffentlichkeit richten. Selbst der »Transit of Venus March« des legendären US-amerikanischen Komponisten John Philip Sousa, komponiert anlässlich des Venusdurchgangs von 1882, wird immer häufiger aufgeführt – nachdem er über hundert Jahre nicht gespielt wurde.

Unterdessen planen die professionellen Astronomen nicht nur Beobachtungen mit Teleskopen auf der Erde und im Weltall, sondern auch Feierlichkeiten aus Anlass des Venusdurchgangs. So treffen sich die Mitglieder der Internationalen Astronomischen Union (IAU) zu einer Konferenz nahe jenem Ort, an dem Horrocks 1639 den Venusdurchgang beobachtet hatte. Und die Arbeitsgruppe »Venusdurchgänge« der IAU regt an, Erinnerungstafeln an Orten zu installieren, von denen aus historische Venusdurchgänge beobachtet worden sind.



»Als die letzten Durchgänge stattfanden, erwachte die intellektuelle Welt gerade aus äonenlangem Schlummer …«

William Harkness, 1882

Für die Forscher ist der Venusdurchgang auch deshalb interessant, weil er eine seltene Möglichkeit bietet, Methoden zu entwickeln und zu testen, mit denen sich Planeten bei anderen Sternen entdecken und untersuchen lassen. Die große Mehrheit der bislang entdeckten 110 extrasolaren Planeten wurde anhand der winzigen periodischen Bewegungen ihres Zentralsterns aufgespürt, die durch den Einfluss der Schwerkraft des Planeten zu Stande kommen.

Erdtransit im Jahre 2084

Doch 1999 konnten Astronomen erstmals die Entdeckung eines Planeten mit einer anderen Methode melden: Der Trabant war von der Erde aus gesehen vor seinem Mutterstern vorbeigezogen und hatte dessen Licht geringfügig, aber messbar abgeschwächt: Um 1,7 Prozent verringerte sich die Helligkeit des 153 Lichtjahre entfernten Sterns während des dreistündigen Vorübergangs des Planeten. Im Gegensatz zum konventionellen Entdeckungsverfahren erlaubt die Transitmethode den Astronomen auch, die Bahnebene des Planeten zu bestimmen – und damit lässt sich dann die Masse des Planeten ermitteln und nicht nur wie sonst eine Untergrenze für seine Masse. Und da die Stärke der Lichtabschwächung ein Maß für die Größe des Planeten ist, können die Wissenschaftler sogar die mittlere Dichte des Himmelskörpers abschätzen.

Die US-amerikanische Raumfahrtbehörde Nasa plant sogar, einen Satelliten mittels der Transitmethode nach extrasolaren Planeten suchen zu lassen. Die »Kepler« genannte Sonde soll 2007 starten und vier Jahre lang die Helligkeit von 100 000 Sternen überwachen. Da die Fotometer des Satelliten selbst geringste Helligkeitsschwankungen nachweisen können, vermag Kepler sogar erdähnliche Planeten aufzuspüren. Die Beobachtungen des diesjährigen Venusdurchgangs können den Forschern helfen, die Instrumente von Kepler zu testen und zu kalibrieren.

Hier also schließt sich der Kreis der Beobachtungen der Venusdurchgänge – vom Menschen Kepler zum Satelliten Kepler. Newcomb, Harkness und ihre Zeitgenossen wären sicherlich überrascht über den Fortschritt der Astronomie seit 1882. Und wie wird erst die Lage der Zivilisation und der Wissenschaft sein, wenn sich die Venus im Jahr 2117 wieder vor die Sonne schiebt? Es ist durchaus möglich, dass bis dahin ein Erddurchgang vom Mars aus beobachtet wurde, wie es Arthur C. Clarke beschrieben hat. Falls am 10. November 2084 Menschen auf dem Mars weilen, so können sie ihre Heimatwelt als dunklen Punkt vor der hellen Sonnenscheibe sehen. Das wäre ein weiterer Meilenstein in der Geschichte der Planetendurchgänge und der menschlichen Erforschung des Kosmos. ◁

AUTOR UND LITERATURHINWEISE

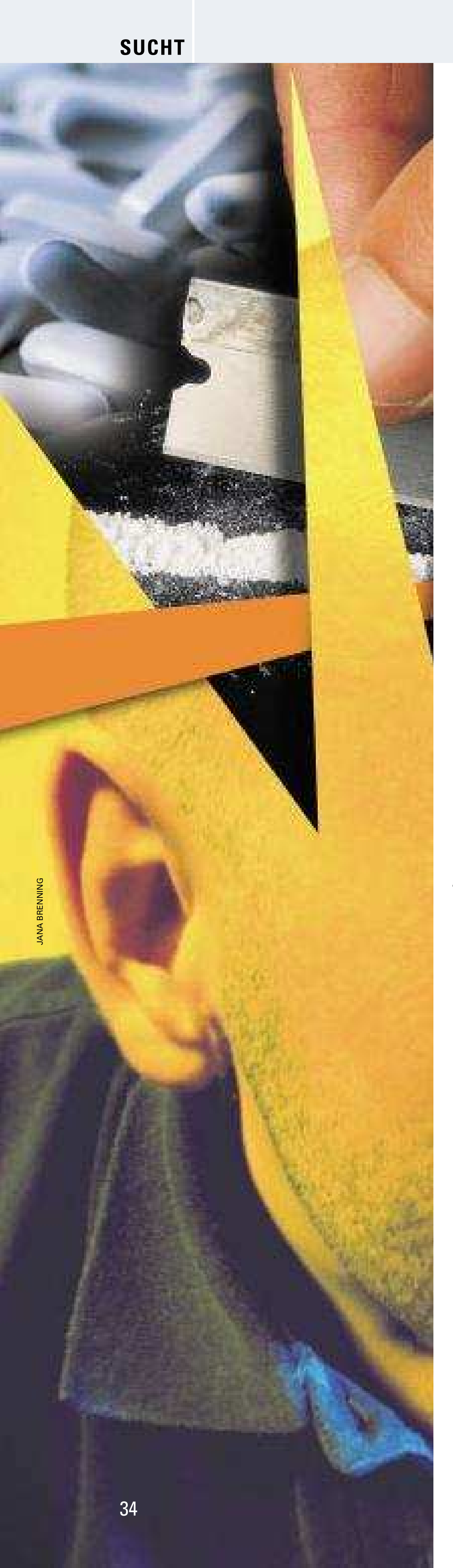


Steven J. Dick ist Chefhistoriker der Nasa. 25 Jahre lang arbeitete er als Astronom und Wissenschaftshistoriker am U.S. Naval Observatory, jenem Institut, das die US-amerikanischen Expeditionen zu den Venusdurchgängen 1874 und 1882 durchführte. Dick war Präsident der Kommission für die Geschichte der Astronomie in der Internationalen Astronomischen Union und ist nun Vorsitzender der Arbeitsgruppe Venusdurchgänge.

The transits of Venus. Von William Sheehan und John Westfall. Prometheus, 2003

The transit of Venus: the quest to find the true distance of the sun. Von David Sellers. Magavelda Press, 2001

Weblinks zu diesem Thema finden Sie bei www.spektrum.de unter »Inhaltsverzeichnis«.


JANA BRENNING

Das süchtige Gehirn

Das Suchtgedächtnis verschwindet mit dem körperlichen Entzug nicht. Die Erforschung der neuronalen Hintergründe könnte dazu verhelfen, diese Spuren zu tilgen – oder zumindest die Rückfallgefahr zu schwächen.

Von Eric J. Nestler und Robert C. Malenka

Ein feiner Streifen weißen Pulvers auf einem kleinen Spiegel. Eine Spritze. Ein Löffel. Fatalerweise genügt dem Drogenkonsumenten noch nach Jahren oft schon der Anblick des Zubehörs, um nach dem »Kick« zu gieren: dem intensiven Glücksrausch, in dem sich der Betreffende im absoluten Einklang mit sich und der Welt wähnt, alle Sorgen und Schmerzen abfallen, die Gedanken und Sinne scharf und klar, die Gefühle stark und warm erscheinen.

Nur hält der Zustand des »Flash« nicht lange an. Wer nun aber wiederholt zu der Suchtdroge greift, wird bald merken, dass sich in ihm etwas verändert. Damit die Hochstimmung aufkommt, muss er die Ration steigern. Und allein um sich wie früher einfach nur normal zu fühlen und im Alltag zurechtzukommen, braucht er jetzt seine Droge. Ohne sie ist er niedergeschlagen und fühlt sich schwach, ja sogar körperlich krank. Das Potenzial, Sucht zu erzeugen, haben

IN KÜRZE

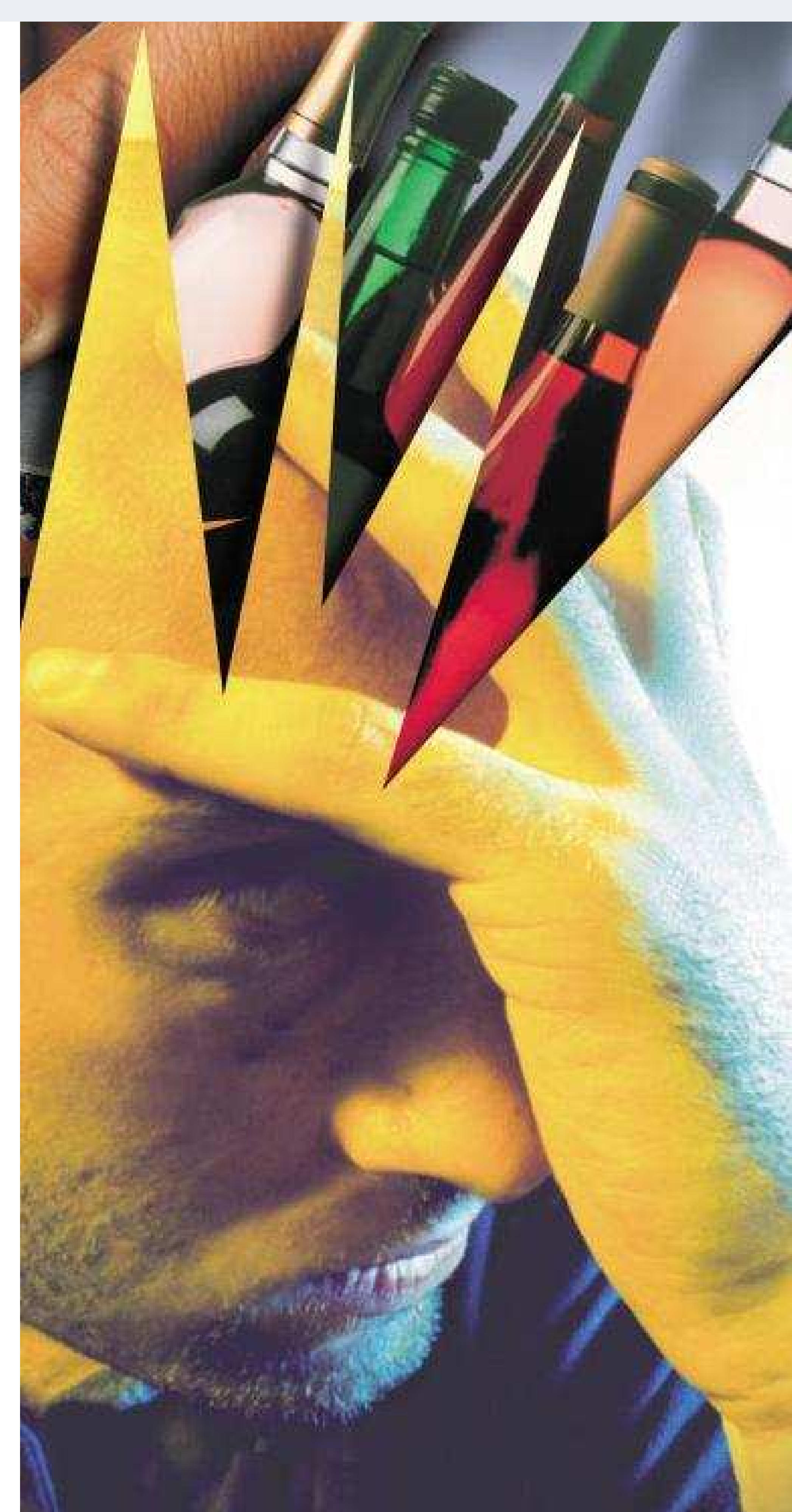
► Obwohl die verschiedenen Suchtstoffe ganz unterschiedliche Gehirnmechanismen manipulieren, wirken sie alle über das **Belohnungssystem des Gehirns**. Im natürlichen Zusammenhang bestärkt dieses Lustsystem erfolgreiches Verhalten. So graben sich normalerweise günstige Strategien im Gehirn ein.

► Bei wiederholtem Drogenkonsum bilden sich **molekulare Anpassungen** an die Situation aus. Allein kann das Gehirn nun immer schlechter Glücksgefühle und schließlich sogar ein normales psychisches und körperliches Wohlgefühl erzeugen. Der Organismus »schreit« nach der Droge.

► Auch nichtstoffliche Suchtformen, etwa **Spielsucht**, **Esssucht**, **Arbeitssucht**, manifestieren sich anscheinend in gleicher Weise im Belohnungssystem.

► Chronischer Missbrauch erzeugt auch bleibende Veränderungen. Genaue Kenntnisse der neuronalen Hintergründe von Sucht könnten **neue Behandlungswege** eröffnen, um den zellulären und molekularen Entgleisungen zu begegnen.

Rauschgifte, aber auch Alkohol und Nikotin haben bei Süchtigen bleibende Spuren im Gehirn gelegt. Deswegen kann lebenslang schon die geringste Assoziation mit dem Drogenkonsum ein unwiderstehliches Verlangen nach dem Suchtstoff auslösen.



nicht nur »harte« Drogen wie Heroin oder Kokain, sondern beispielsweise auch »Speed« (Amphetamine), Alkohol und Nikotin.

Der Drogensüchtige erlebt einen Teufelskreis: Bald verliert er die Kontrolle über den Konsum, und das »Craving« – der unbezwingbare Drang, sich den Stoff erneut zuzuführen – gewinnt nach jedem Trip schnell wieder überhand. Die Droge bestimmt nun das Leben. Auf Dauer schädigt sie nicht nur die Gesundheit des Betreffenden, sondern der Süchtige gerät auch schnell in finanzielle und soziale Schwierigkeiten.

Rauschgifte aktivieren im Gehirn das so genannte »Lust-« oder »Belohnungssystem«. Dabei handelt es sich um tief liegende komplexe neuronale Schaltkreise, die zu dem Wohlgefühl etwa nach einem guten Essen oder nach dem Geschlechtsverkehr beitragen. Auch beispielsweise ein netter Witz, der Anblick eines schönen Gesichts oder der Gedanke an ein großes Sparkonto aktivieren dieses System. Biologisch gesehen hilft das Belohnungssystem des Gehirns normalerweise dem Organismus, das Richtige zu tun, um zu überleben und sich fortzupflanzen.

Seit Neurobiologen das Lustzentrum vor fünfzig Jahren zufällig entdeckten, haben sie schon eine Menge über die an Sucht beteiligten zellulären und molekularen Mechanismen herausgefunden. Immer besser beginnen sie auch zu verstehen, wieso Drogen Sucht erzeugen und wieso sich dies praktisch lebenslang in die Strukturen des Belohnungssys- ▷

▷ tems eingräbt. Das erhellt die scheinbare Widersprüchlichkeit zwischen der Gewöhnung an die Substanz – der »Toleranz« – einerseits und der »Sensitisierung« (der überempfindlichen Reaktion auf den Suchtstoff) andererseits: Zwar benötigt der Betroffene immer mehr davon für die gleiche euphorisierende Wirkung, die Nervenschaltkreise stumpfen sozusagen dagegen ab – und doch reagiert der Organismus immer intensiver auf die Droge. So kommt es, dass der Drang, sich die Substanz unverzüglich verpassen zu müssen, immer leichter entsteht. Noch nach Jahren kann dieses Bedürfnis beim winzigsten Anlass unwiderstehlich hervorbrechen. Schon schlechte Stimmung kann dazu genügen. Könnte man das Suchtgedächtnis sozusagen wieder leeren oder diese Gedächtnisspeicher verschließen, würde vielen Drogenopfern zu einem unbeschwerteren Leben verhelfen.

Tiere als bereitwillige Drogenkonsumenten

Auf die Spur der Gehirnbahn, in der sich Sucht manifestiert, führten Tierstudien: Ratten konnten einzelne Gebiete ihres Gehirns über eine eingepflanzte Elektrode selbst stimulieren, wenn sie eine Taste drückten; einen bestimmten Ort mochten sie offenbar besonders gern reizen – sie vergaßen darüber sogar das Fressen. Seit rund vierzig Jahren untersuchen Hirnforscher dieses System genauer im Zusammenhang mit Rauschmitteln und Suchtdrogen aller Art. Ratten, Mäuse oder Affen, die durch Drücken auf verschiedene Hebel selbst bestimmen können, ob sie Futter erhalten, über eine intravenös gelegte Kanüle eine Salzlösung zugeführt bekommen oder aber als dritte Option eine typische Rauschdroge, verpassen sich schon nach ein paar Tagen bereitwillig immer wieder zum Beispiel Kokain, Heroin oder Amphetamine.

Nach ihrem Verhalten zu urteilen, werden die Tiere dabei bald süchtig. Sie kümmern sich dann mehr um die Zufuhr der Droge als um normales Verhalten wie Schlafen oder Fressen. Manche von ihnen würden dabei verhungern oder an Erschöpfung sterben. Hat die Substanz, wie Kokain, ein sehr hohes Suchtpotenzial, verbringt die Ratte nötigenfalls viele Stunden täglich am Hebel, wenn sie ihn für den nächsten Schuss ein paar hundert Mal drücken muss. Zu beobachten ist auch, dass die Tiere sich sehr oft in der Nähe der Drogentaste aufhalten.

Wird der Suchtstoff nicht mehr bereitgestellt, hören Ratten bald auf, den Hebel zu bedienen. Doch sogar nach monatelanger Abstinenz betätigen sie ihn unverzüglich wieder, sofern sie nur einen Hauch des Stoffs verspüren – oder wenn sie sich in dem alten Käfig wiederfinden. Aufschlussreich ist auch, dass die Nager bei unangenehmen Erlebnissen und in Stresssituationen in ihr altes Suchtverhalten zurückfallen. Das alles erinnert an die Reaktionen drogensüchtiger Menschen.

Mittlerweile haben Hirnforscher die am Drogenmissbrauch beteiligten Gehirnregionen kartiert. Sie kennen heute die zentrale Funktion des Belohnungssystems dabei. Verschiedenste Suchtdrogen, und sogar andere Suchterscheinungen wie etwa Spiel- oder Esssucht, scheinen sich letztlich in derselben Gehirnbahn regelrecht einzufressen – auch wenn sie sonst durchaus auf unterschiedliche Art, und auch an verschiedenen Stellen, in neuronale Prozesse eingreifen. Im Belohnungssystem übernehmen die Drogen das Kommando über die neuronalen Schaltkreise. Stärker und anhaltender als jedes natürliche Ereignis stimulieren sie deren Aktivität.

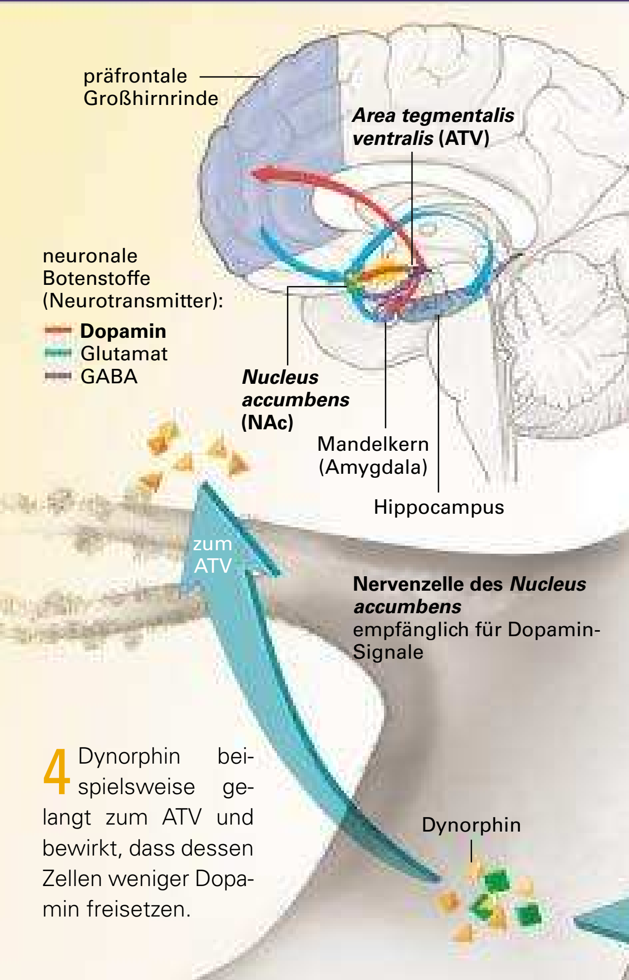
Die Schlüsselkomponente ist hierbei der Botenstoff »Dopamin« – einer der so genannten Neurotransmitter, die Signale zwischen Nervenzellen übermitteln. Den entscheidenden Schaltkreis bezeichnen die Forscher als »mesolimbisches Dopaminsystem« oder einfach »mesolimbisches System«: eine Gruppe von Nerven-

Drogenmissbrauch: Angriff auf das Gehirn

Lustsystem fest im Griff der Sucht

Chronischer Missbrauch von Drogen verändert eine entscheidende neuronale Bahn des Belohnungs- oder Lustsystems: den Signalweg von der *Area tegmentalis ventralis* (ATV) zum *Nucleus accumbens* (NAc), auf dem der neuronale Botenstoff »Dopamin« eingesetzt wird (mittlerer roter Pfeil).

Die farbigen Pfeile auf dem Gehirnschema zeigen einige der Bahnen, auf denen die beiden genannten Gebiete mit weiteren an einer Sucht beteiligten Hirnregionen kommunizieren.



zellen, die von der *Area tegmentalis ventralis* (ATV) im Mittelhirn an der Hirnbasis aus lange erregungsleitende Fortsätze – Axone – zu Zielregionen im Vorderhirn schicken, wo sie bei Bedarf Dopamin freisetzen (Schema unten).

Zielregion im Vorderhirn ist insbesondere der *Nucleus accumbens* (NAc), ein Kerngebiet tief unterhalb der frontalen Großhirnrinde. Die Dopaminbahn zwischen diesen beiden Zellgruppen ist für Sucht entscheidend: Tiere mit Läsionen dieser Hirngebiete interessieren sich nicht mehr für Suchtdrogen.

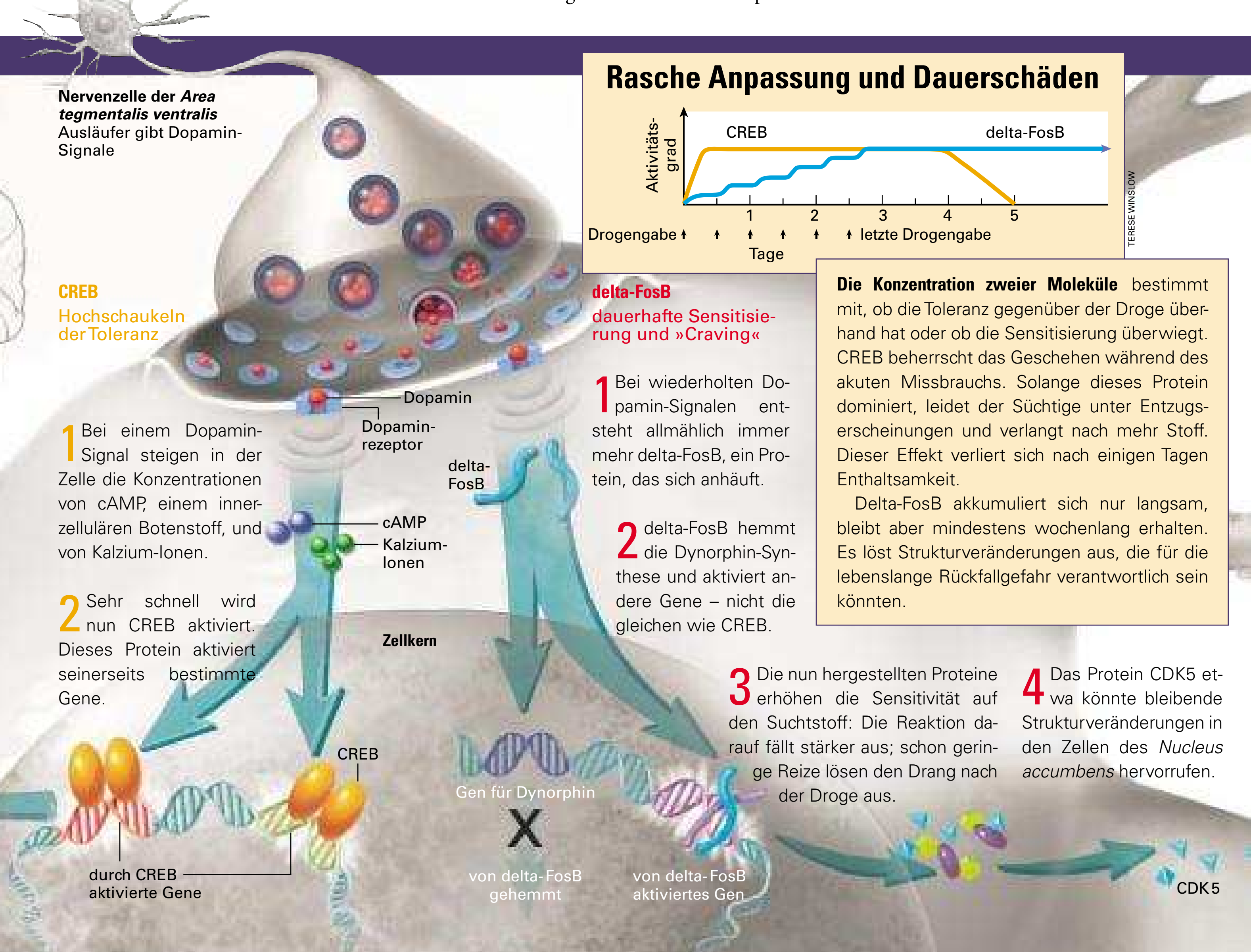
Neuronale Belohnungssysteme sind stammesgeschichtlich sehr alt. Schon der im Boden lebende, als Forschungsobjekt beliebte Fadenwurm *Caenorhabditis elegans* besitzt eines. Setzt man bei ihm die Hand voll Dopamin liefernder Schlüsselneuronen außer Gefecht, kriecht der millimeterlange Wurm an seinem Leibgericht, einem Klumpen Bakterien, einfach vorbei.

Belohnungssystem: mit Gedächtnisstrukturen verknüpft

Das Belohnungssystem von Säugern hat einen komplexeren Aufbau. Außerdem ist es mit einigen anderen Gehirnregionen verschaltet, die Erlebnisse mit Gefühlen belegen helfen. Ihr Zusammenspiel bestärkt Verhalten, das angenehme Empfindungen erzeugt, wie Fressen, Sex oder Sozialkontakt. So trägt der Mandelkern (die Amygdala) dazu bei, die Güte des Erlebten zu bewerten. Er beeinflusst, ob ein Verhalten zukünftig wiederholt werden sollte oder nicht, und hilft, zwischen Erfahrungen und Reizen Verknüpfungen zu schmieden. Eine weitere wichtige Hirnregion in dem Zusammenhang ist der Hippocampus, der beim Gedächtnis mitwirkt und mit dafür zuständig ist, Erlebnisse mitsamt dem Kontext im Gedächtnis abzulegen.

Die vordere Großhirnrinde, der präfrontale Cortex, schließlich koordiniert und verarbeitet all diese Informationen. Dort wird auch über das endgültige Verhalten entschieden. Denn die mesolimbische Dopaminbahn fungiert dabei nur als Gradmesser. Sie teilt den anderen Hirnzentren lediglich mit, in welchem Maße eine Aktivität sich lohnt. Je höher der Wert, desto eher wird der Organismus sie in guter Erinnerung haben und wieder zeigen.

Dass diese Schaltkreise auch beim Menschen vorkommen und unser Ver- ▷



Die Konzentration zweier Moleküle bestimmt mit, ob die Toleranz gegenüber der Droge überhand hat oder ob die Sensitisierung überwiegt. CREB beherrscht das Geschehen während des akuten Missbrauchs. Solange dieses Protein dominiert, leidet der Süchtige unter Entzugserscheinungen und verlangt nach mehr Stoff. Dieser Effekt verliert sich nach einigen Tagen Enthaltsamkeit.

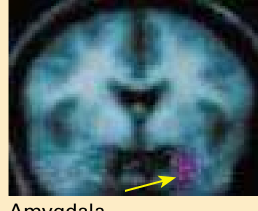
Delta-FosB akkumuliert sich nur langsam, bleibt aber mindestens wochenlang erhalten. Es löst Strukturveränderungen aus, die für die lebenslange Rückfallgefahr verantwortlich sein könnten.

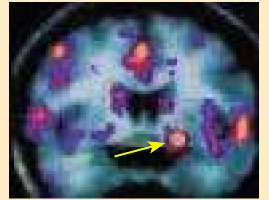
Das Gehirn Kokainsüchtiger

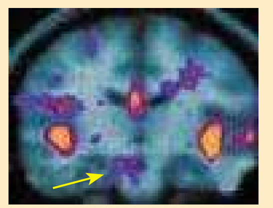
Hotspots nach dem Konsum

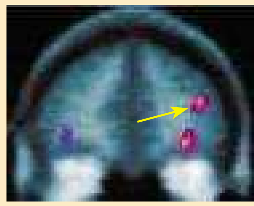
ALLE SCANS: HANS C. BREITER, MASSACHUSETTS GENERAL HOSPITAL


Nucleus accumbens

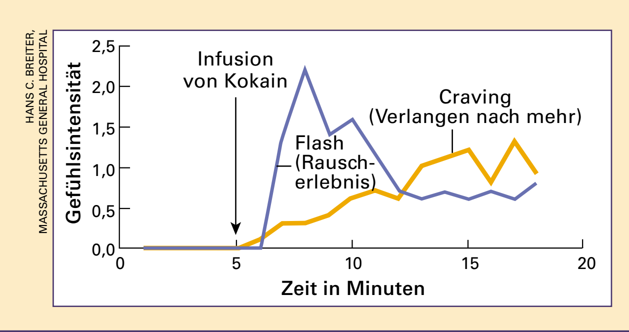

Amygdala


Ausläufer der Amygdala


Area tegmentalis ventralis


präfrontale Großhirnrinde

HANS C. BREITER, MASSACHUSETTS GENERAL HOSPITAL



Gehirnaufnahmen von Kokainsüchtigen bestätigen, dass sich die Aktivität vieler Hirnregionen direkt nach der Drogenzufuhr verändert. Hier sind nur einige davon markiert: Je heller die Farbe, desto mehr ist das Gebiet beeinflusst.

Die Teilnehmer der Studie gaben während des Versuchs an, wie stark jeweils das Rauscherlebnis und der Drang nach mehr Drogenkonsum in den Minuten nach der Gabe waren. Die *Area tegmentalis ventralis* und der Ausläufer der Amygdala sind demnach für den »Flash« wichtig, die Amygdala sowie der *Nucleus accumbens* für »Craving« (Grafik). Der Drang nach mehr Stoff steigt, wenn das Rauscherlebnis abflaut.

▷ halten ähnlich wie bei anderen Säugern steuern, ergaben in den letzten zehn Jahren Gehirnaufnahmen, auf denen die augenblickliche Aktivität einzelner Hirngebiete zu beobachten ist. Auch das menschliche Belohnungssystem spricht nicht nur an, wenn durch ein natürliches Verhalten eine angenehme Empfindung aufkommt, sondern ebenfalls bei Drogenkonsum.

Bei Kokainsüchtigen beispielsweise flackert der *Nucleus accumbens* – wo das Dopamin ankommt – scheinbar regelrecht auf, sobald man ihnen die Droge anbietet (siehe Bilder oben). Eine kurze Filmsequenz vom Kokain-Schnupfen, ja nur ein Foto von den Utensilien hat dieselbe Wirkung. Gleichzeitig reagieren auch der Mandelkern sowie einige Regionen der Großhirnrinde. Dieselben Regionen springen bei Spielsüchtigen an, denen Fotos von Glücksautomaten gezeigt werden. Demnach scheint die mesolimbische Bahn auch bei nichtstofflichen Suchtformen eine Schlüsselfunktion einzunehmen.

GLOSSAR

▶ **Mesolimbisches Dopaminsystem:** wichtiger Teil des Belohnungs- oder Lustsystems; Neuronen der ***Area tegmentalis ventralis*** **(ATV)** schicken den neuronalen Botenstoff **Dopamin** unter anderem zum ***Nucleus accumbens*** **(NAc)**

▶ **CREB; delta-FosB:** zwei Proteine für die Genregulation

▶ **Toleranz:** verminderte Wirkung der gleichen Drogenmenge

▶ **Abhängigkeit:** physiologische Anpassung bei akutem Konsum; Grund für Entzugserscheinungen

▶ **Sensitisierung:** gesteigerte Reaktion auf die gleiche Dosis

Gleiche Wirkung auf viele Weise

Abgesehen von ihrer Wirkung auf das Belohnungssystem erzeugen die verschiedenen Suchtstoffe sonst teilweise durchaus unterschiedliche körperliche Effekte. Kokain steigert beispielsweise stark den Herzschlag, wirkt also als Stimulans, und das Opiat Heroin lindert Schmerzen und wirkt sedierend. Trotzdem sorgen beide dafür, dass der *Nucleus accumbens* mit Dopamin überflutet wird, beziehungsweise sie täuschen dort eine Dopaminschwemme vor (siehe Kasten S. 40).

Wie übertönen Drogen den körpereigenen Belohnungseffekt? Normalerweise würden die dopaminhaltigen Zellausläufer den Botenstoff freigeben, wenn sie an der Kontaktstelle zum nächsten Neuron ein Signal ihrer Zelle übertragen sollen. Dann durchquert das Dopamin dort den schmalen synaptischen Spalt zu dem Neuron, wo es an ein passendes Rezeptormolekül andockt, und das Neuron empfängt das Signal. Später schafft ein Transportsystem das Dopamin wieder zurück in den Zellausläufer zur Wiederverwendung.

Die Suchtdrogen verstärken oder simulieren, jede auf ihre Weise, die Dopaminwirkung. Kokain und ein paar andere Stimulanzien hemmen vorübergehend das betreffende Protein für den Abtransport des Signalmoleküls. So erzeugen sie an den Zellen des *Nucleus accumbens* einen Dopaminüberschuss. Die Opiate hingegen, also auch Heroin, bewirken eine Dopaminschwemme einerseits dadurch, dass sie sich an hemmende Nervenzellen im ATV binden, dem Mittelhirngebiet, wo auch die dopaminproduzierenden Neuronen liegen. Normalerweise können diese hemmenden Nervenzellen die Dopaminneuronen abschalten, was die Opiate aber verhindern. Daneben wirken Opiate auch im *Nucleus accumbens* selbst, denn sie imitieren körpereigene Moleküle, die so genannten Endorphine, die dort ebenfalls als euphorisierende Botenstoffe fungieren (siehe Kasten S. 40).

Leider ist beim Drogenkonsum das unmittelbare Hochgefühl, welches als Belohnung und Bestärkung erlebt wird, nicht die einzige Folge der Dopaminüberflutung. Bald, besonders bei wiederholtem Gebrauch der Substanz, beginnt sich das Belohnungssystem an den Zustand anzupassen. Das leitet die Sucht ein.

Für frühe Suchtstadien sind Toleranz und als dessen Folge Abhängigkeit charakteristisch. Toleranz meint, dass sich der Organismus an die Droge gewöhnt hat, also mehr davon verkraftet und vor allem auch mehr benötigt, um noch die gleiche Wirkung etwa auf Stimmung oder Konzentrationsvermögen zu verspüren: ein Prozess, der sich steigert. Zwangsläufig erzeugt die Gewöhnung mitsamt der zunehmenden Dosierung des Suchtstoffs Abhängigkeit von der Droge. Der Körper hat sich nun umgestellt und kommt ohne sie nicht mehr zurecht. Wird sie ihm jetzt vorenthalten, bedeutet das entsetzlich quälende seelische und oft auch körperliche Zustände.

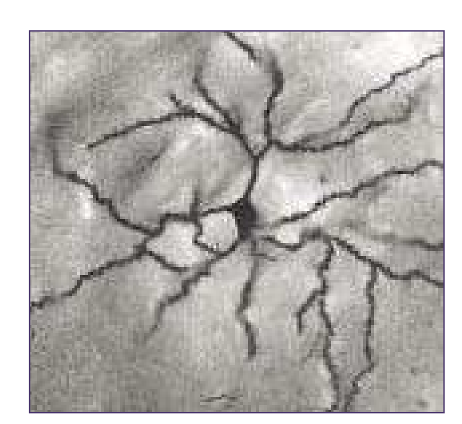
Wie sich das Belohnungssystem auf den Drogenkonsum einstellt

Beides, Toleranz wie Abhängigkeit, ist eine vertrackte Auswirkung davon, dass wiederholter Drogenkonsum die normalen Abläufe im Belohnungssystem des Gehirns immer mehr abschwächt. Das System versucht nämlich gewissermaßen, der unnatürlichen Überschwemmung mit Dopamin entgegenzuwirken. Dabei hilft das Protein »CREB« mit, das als ein so genannter Transkriptionsfaktor die Aktivität bestimmter Gene reguliert.

CREB selbst wird von einem kleinen Signalmolekül aktiviert, dessen Menge in den *Nucleus-accumbens*-Zellen durch das Dopamin-Signal steigt. Nun stimuliert CREB die Synthese bestimmter Proteine, welche das Belohnungssystem drosseln (siehe Kasten S. 36/37). Unter anderem entsteht Dynorphin, ein Protein mit opiatähnlichen Eigenschaften. Dieses Molekül hemmt die Dopamin liefernden Zellen des ATV über eine neuronale Rückwärtsschleife. Das bedeutet: Das System liefert jetzt von selbst nicht mehr genug des Botenstoffs Dopamin, um dem Körper angenehme Rückmeldungen zu geben. Also verlangt er dringend nach der Droge – er ist von ihr abhängig.

Die hemmende Rückkopplung erklärt zudem die steigende Toleranz gegenüber dem Suchtstoff – also dessen sinkende Belohnungskraft sowie das Verkraften größerer Substanzmengen – in der Phase chronischen Drogenmissbrauchs: Das System drosselt die Drogenwirkung, indem es eigene Moleküle dagegensetzt. Versucht der Konsument den dämpfenden Effekt mit mehr Suchtstoff zu übertönen, produzieren die Zellen noch mehr eigene hemmende Moleküle.

Der geschilderte Prozess dürfte die Symptome in der akuten Phase des Drogenkonsums mitbestimmen. Dass Drogensüchtige auch Jahrzehnte nach dem Entzug noch rückfallgefährdet sind, muss allerdings mit anderen Mechanismen zusammenhängen. Denn CREB wird bei Drogenverzicht schon nach ein paar Tagen wieder inaktiviert. Dann schwindet auch die Toleranz. Sie macht jetzt dem gegenteiligen Effekt Platz, der Sensitisierung: In Zukunft ist der Organismus für den Suchtstoff überempfindlich, was die Rückfallgefahr zu einem wesentlichen Teil bedingt.







NACHDRUCK AUS: S. D. NORRHOLM ET AL., NEUROSCIENCE BD. 116, 2003; MIT FREUNDL. GENEHMIGUNG VON ELSEVIER

Erhalten Versuchstiere Drogen, die nicht süchtig machen, weisen die signalempfangenden Fortsätze von Neuronen im *Nucleus accumbens* (ganz oben) die normale Dichte von Dornen auf (Mitte). Wenn die Tiere kokainsüchtig sind, sitzen die Dornen viel dichter (unten). Dieses Phänomen könnte der Grund für die Sensitisierung und stete Rückfallgefahr bei einer Sucht sein.

Der kleinste Auslöser, sogar schon der Gedanke an die Droge weckt fortan das unwiderstehliche Verlangen – das »Craving« – nach dem Stoff. In diesem Zusammenhang stießen die Forscher auf einen weiteren Transkriptionsfaktor, »delta-FosB« genannt. Dieses Protein ist ungewöhnlich stabil. Es entsteht Tierstudien zufolge nach Drogenkonsum in Neuronen des *Nucleus accumbens* und einigen anderen Hirnregionen und bleibt dort einige Wochen bis Monate aktiv. Dadurch reichert es sich bei wiederholter Drogengabe allmählich an, nimmt also bei chronischem Missbrauch immer mehr zu. Und die hohe Konzentration kann noch lange nach dem letzten Drogenkonsum die genetische Aktivität der Nervenzellen weiter beeinflussen.

Bleibende Spuren der Sucht

Mäuse, die dieses Protein wegen einer genetischen Mutation im *Nucleus accumbens* im Übermaß bilden, neigen von allein zu Überempfindlichkeit auf Drogen. Sie werden nach dem Entzug auch besonders leicht rückfällig. Interessanterweise produzieren die *Nucleus-accumbens*-Zellen der Nager das Protein delta-FosB auch bei anderen wiederholten angenehmen Ereignissen, zum Beispiel wenn die Tiere ausgiebig in einem Laufrad rennen dürfen oder Süßigkeiten erhalten – ein Hinweis, dass dieser Transkriptionsfaktor auch bei Suchtformen anderer Art mitwirkt. Es könnte sein, dass das Protein generell gebildet wird, wenn man etwas als wohltuend erlebt – oder genauer gesagt, dass der Faktor beteiligt ist, wenn wir ein positiv bestärktes Verhalten gern wiederholen.

Allerdings wird auch delta-FosB nach einigen Monaten Drogenenthaltsamkeit wieder auf ein Normalmaß heruntergedrosselt. Wieso die Sensitisierung danach nicht verschwindet, könnte ein erst kürzlich entdecktes Phänomen erhellen. Hirnforscher wissen, dass die Zellen des *Nucleus accumbens* bei chronischem Missbrauch von Kokain und anderen Drogen deutlich mehr so genannte den- ▷

▷ dritische Dornen zum Auffangen von Signalen ausbilden. Diese knospenartigen Strukturen sitzen dicht bei dicht auf den verzweigten Ästen der Neuronen, die dem Signalempfang dienen. Nun zeigte sich bei Nagern, dass einige Monate nach Ende des Drogenkonsums noch immer neue Dornen ausknospen (siehe Bilder S. 39).

Ist dafür die noch vorhandene erhöhte Konzentration von delta-FosB verantwortlich? Noch wissen wir nicht sicher, ob auch die fortdauernde übersteigerte Empfänglichkeit des Gehirns für Drogenreize mit den zusätzlich entstandenen dendritischen Dornen zusammenhängt. Es würde bedeuten, dass die Strukturen nun bleibend extrem sensible Signalantennen haben. Vielleicht ist das tatsächlich der Schlüsselmechanismus dafür, dass ein ehemals Abhängiger seine Sucht lebenslang nicht los wird.

Verstärkte Stimuli aus anderen Hirnregionen

Am Drogengedächtnis beteiligen sich, wie bereits angedeutet, weitere Hirnstrukturen, vor allem Mandelkern, Hippocampus und vorderes Stirnhirn. Diese Gebiete stehen mit dem *Nucleus accumbens* und dem ATV in engem wechselseitigem Austausch. Ihre Anweisungen signalisieren sie dem Belohnungssystem durch den Botenstoff »Glutamat« (siehe Kästen unten und S. 36/37).

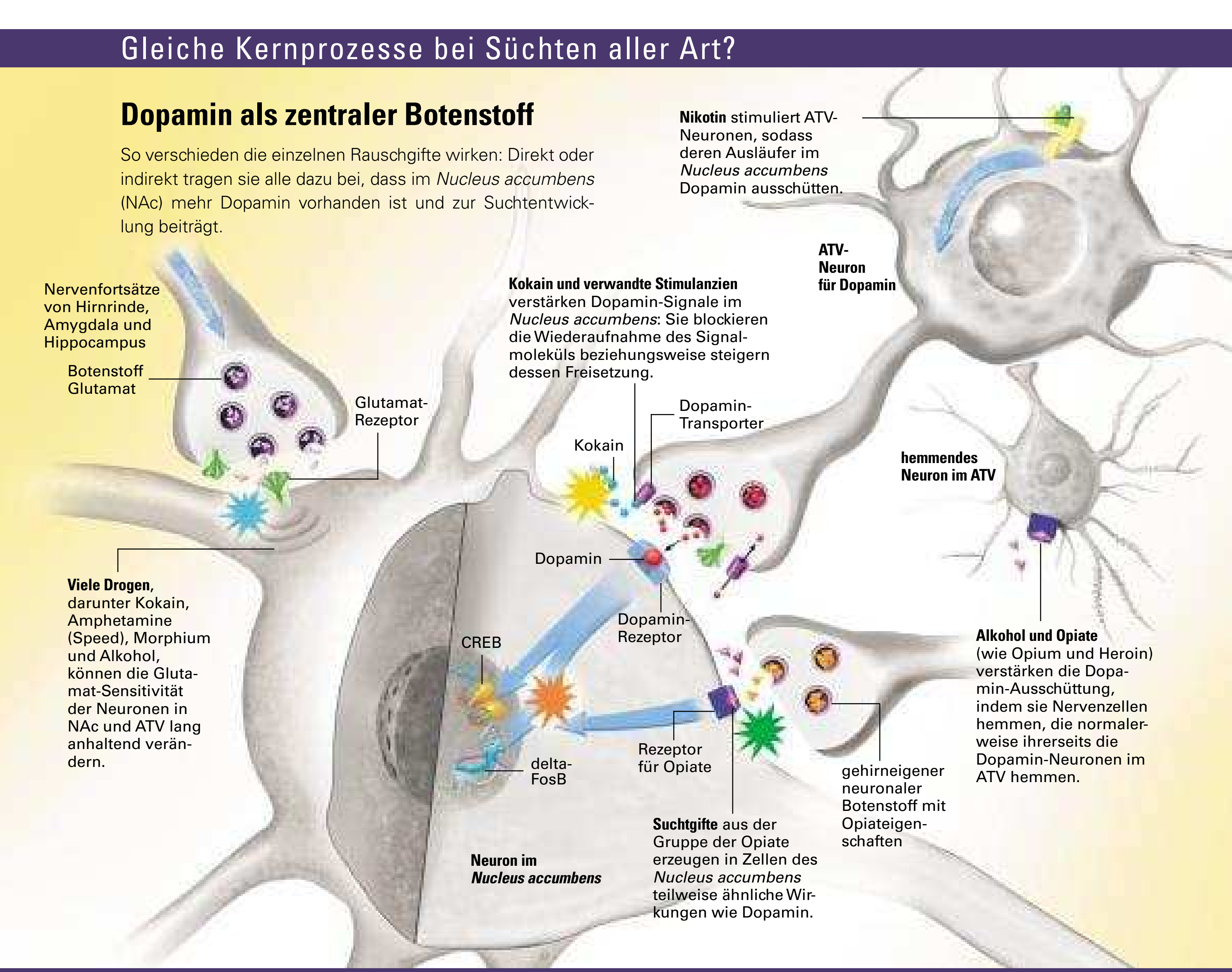
Wenn Rauschgifte das Belohnungssystem mit Dopamin überschwemmen, verändert das für mehrere Tage auch die Empfindlichkeit von *Nucleus accumbens* und ATV gegenüber Glutamat. Auf Grund dessen wird Tierexperimenten zufolge wohl einerseits im *Nucleus accumbens* mehr Dopamin freigesetzt werden, und zusätzlich scheinen auch die dortigen Nervenzellen stärker auf Dopamin anzusprechen. Beides aber fördert die Aktivität der beim Drogenkonsum verhängnisvollen Transkriptionsfaktoren CREB und delta-FosB. Was vielleicht das Drogengedächtnis noch mehr beeinflusst: Die erhöhte Sensitivität auf Glutamat könnte jene neuronalen Bahnen stärken, die Erinnerungen an den Drogenkonsum mit Lustgefühlen verknüpfen.

Ganz klar ist noch nicht, wie Drogen die Glutamat-Sensitivität von Neuronen

Gleiche Kernprozesse bei Süchten aller Art?

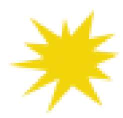
Dopamin als zentraler Botenstoff

So verschieden die einzelnen Rauschgifte wirken: Direkt oder indirekt tragen sie alle dazu bei, dass im *Nucleus accumbens* (NAc) mehr Dopamin vorhanden ist und zur Suchtentwicklung beiträgt.

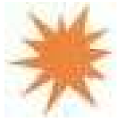


im Belohnungssystem verändern. Gedächtnisforscher kennen aber im Hippocampus einen Mechanismus für eine bestimmte Form des Lernens, der vielleicht ähnlich funktioniert. Dort dürfte der Vorgang an der Gedächtnisbildung beteiligt sein. Und zwar steigt die Empfindlichkeit der Zellen für Glutamat für mehrere Stunden, nachdem sie wiederholt kurz angeregt wurden – offenbar weil vorübergehend Rezeptorproteine für Glutamat aus Speichern im Zellinnern an die äußere Zellmembran verfrachtet werden. Rauschgifte beeinflussen im Belohnungssystem ebenfalls den Transport von Glutamat-Rezeptoren. Es gibt Anzeichen, dass sie auch auf die Herstellung einiger dieser Rezeptoren Einfluss nehmen.

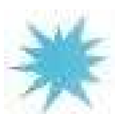
Ansätze für Therapien



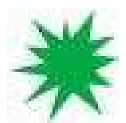
Ein (noch nicht verfügbares) Anti-Kokain-Medikament könnte verhindern, dass Kokain den Dopamin-Transporter blockiert.



Ein (noch nicht verfügbares) Breitband-Medikament könnte CREB oder delta-FosB beeinträchtigen.



Ein (noch nicht verfügbares) Breitband-Medikament könnte bewirken, dass Glutamat den Drogeneffekt nicht verstärkt.



Bereits verfügbare Opiat-Antagonisten wie Naltrexon (sie blockieren Opiat-Rezeptoren) werden auch bei Alkoholismus und Nikotin-Abhängigkeit eingesetzt. Beide Drogen stimulieren die Freisetzung hirneigener Opiate.

TERESE WINSLOW

Was besagen die geschilderten Befunde? Hirnforscher beginnen zu verstehen, wie Drogen das Belohnungssystem verändern und den Organismus süchtig machen. Zwar bleiben viele Zusammenhänge noch offen, aber man kennt schon molekulare Prozesse, die bei chronischem Drogenkonsum zunehmende Gewöhnung und Abhängigkeit erzeugen, sowie auch Moleküle, die noch lange nach dem Drogenentzug wirken und vielleicht das Gehirn dauerhaft prägen. Diese Mechanismen lassen bereits erahnen, wieso ehemals Drogenabhängige so leicht rückfällig werden – wieso sie schon bei winzigsten Substanzmengen wieder nach dem Suchtstoff gieren und schon kleinste Erinnerungsfetzen den Drang zum Rauschgift unbezwinglich machen.

Mit Sicherheit ist das molekulare und zelluläre Geschehen hinter einer Sucht noch viel facettenreicher als hier beschrieben. Sowohl im Belohnungssystem wie in anderen Hirngebieten werden Neurowissenschaftler weitere wichtige Zusammenhänge entdecken. Schon jetzt liefern die bereits erkannten Vorgänge Ideen für neue Medikamente, um Suchtkranken zu helfen.

Medikamente zur Heilung von Drogensucht?

Der Bedarf an innovativen Therapien ist auch in sozialer und gesellschaftlicher Hinsicht enorm. Medizinisch gesehen bewirkt der Missbrauch von Alkohol, Nikotin und anderen Drogen nicht nur die unmittelbaren körperlichen und psychischen Suchtschäden, sondern gehört zu den Hauptursachen für ernste Krankheiten überhaupt, von der Leberzirrhose bis zum Lungenkrebs oder Aids. Allein die ökonomischen Kosten für solche Folgeerkrankungen betragen viele Milliarden. Hinzurechnen muss man gesundheitliche und andere Auswirkungen anderer Zwangskrankheiten wie Ess- oder Spielsucht.

Die heutigen Behandlungsmöglichkeiten therapieren kaum die Sucht selbst. Bestimmte Medikamente verhindern zwar, dass die Droge ihren Zielort im Gehirn erreicht, allerdings fordert der Organismus die Substanz weiterhin. Andere Mittel imitieren Drogenwirkungen, was das Verlangen vermindert und den Entzug erleichtert. Das ersetzt aber vielleicht nur einen Zwang durch einen anderen. Die etablierten Rehabilitationsprogramme sind oft wirklich hilfreich, doch auch sie können das Rückfallrisiko nur vermindern, aber nicht verschwinden lassen.

Von Forschungserkenntnissen wie den hier dargestellten versprechen wir uns neue Therapieansätze. Wir rechnen damit, dass es eines Tages Medikamente geben wird, die Langzeiteffekten des Drogenmissbrauchs auf das Belohnungssystem des Gehirns entgegenwirken oder sie kompensieren. Das könnten beispielsweise chemische Verbindungen sein, die spezifisch mit den Glutamat- oder Dopamin-Rezeptoren im *Nucleus accumbens* interagieren, oder Moleküle, die verhindern, dass in dessen Neuronen die Transkriptionsfaktoren CREB oder delta-FosB aktiv werden (siehe Kasten links).

Wünschenswert wäre auch, besonders suchtanfällige Menschen frühzeitig zu erkennen, um gezielt vorsorgende Maßnahmen einleiten zu können. Sicher spielen beim Drogenmissbrauch die psychischen und sozialen Umstände eine große Rolle. Familienstudien deuten aber darauf hin, dass das Suchtrisiko etwa zur Hälfte auf genetischer Disposition beruht. Allerdings muss man beteiligte Gene erst noch finden.

Weil beim Drogenkonsum Gefühle und soziale Beziehungen involviert sind, können Medikamente allein nicht alles leisten. Doch die Hoffnung besteht, dass zukünftige Therapien zumindest die enormen inneren Kräfte zu dämpfen vermögen, welche eine Sucht antreiben: die Abhängigkeit und das starke Verlangen nach der Droge. ◁

AUTOREN UND LITERATURHINWEISE



Eric J. Nestler und **Robert C. Malenka** erforschen die neurobiologischen Grundlagen der Drogenabhängigkeit. Nestler leitet am Southwestern Medical Center der Universität von Texas in Dallas die Abteilung für Psychiatrie. Malenka hat an der medizinischen Fakultät der Stanford University (Kalifornien) eine Professur für Psychiatrie und Verhaltenswissenschaften.

Incentive-sensitization and addiction. Von Terry E. Robinson und Kent C. Berridge in: Addiction, Bd. 96, Heft 1, S. 103, Januar 2001

Molecular basis of long-term plasticity underlying addiction. Von Eric J. Nestler in: Nature Reviews Neuroscience, Bd. 2, Heft 2, S. 119, Februar 2001

Weblinks zu diesem Thema finden Sie bei www.spektrum.de unter »Inhaltsverzeichnis«.

COCHLEA-IMPLANTAT

Elektroden am Hörnerv

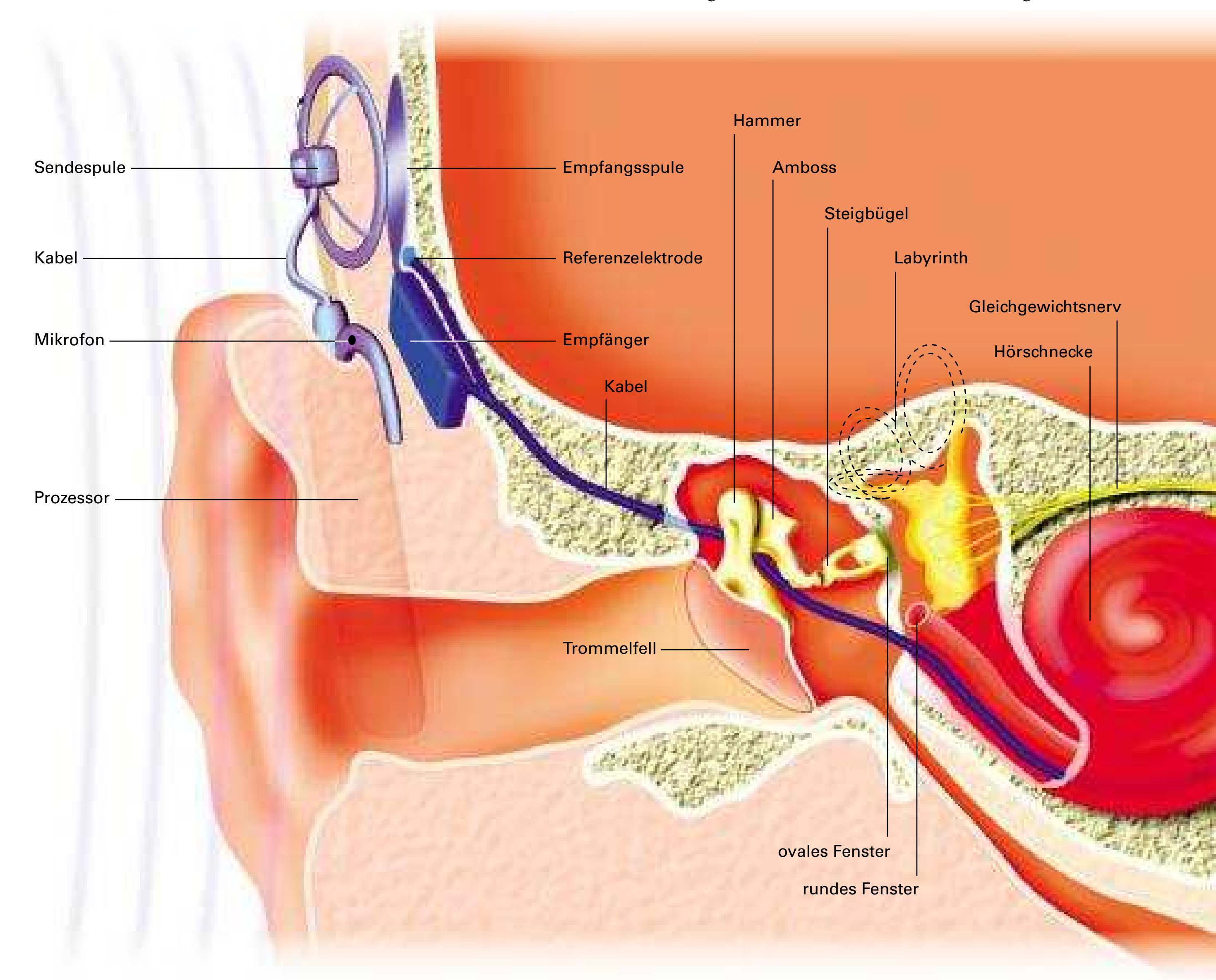
Bei hochgradiger Schwerhörigkeit ersetzt die Technik defekte Sinneszellen.

Von Guido Reetz

Wenn wir hören, werden winzige Härchen im Innenohr durch den Schall ausgelenkt. Sie gehören zu Zellen, die als Reaktion auf diesen mechanischen Reiz elektrische Impulse an den Hörnerv abgeben und ihn so stimulieren, ein Signal an die Verarbeitungszentren des Hörsinns zu leiten. So genannte Cochlea-Implantate sollen diese Funktion zumindest annähernd ersetzen, wenn die Haarzellen bei hochgradiger Schwerhörigkeit defekt sind. Auch sie wandeln Schall in elektrische Signale, doch Elektroden übertragen diese nun auf den Nerv. Mitte der 1970er Jahre erhielten die ersten Patienten solche Implantate. Mittlerweile werden sie weltweit von etwa 75 000 Kindern und Erwachsenen benutzt.

Damit das Gehirn zum Beispiel Sprache erkennt, muss ein Prozessor das Frequenzspektrum des Schallsignals analysieren. Beim Gesunden geschieht das durch den Aufbau der Hörschnecke: Haarzellen an ihrer Basis reagieren auf hohe, solche an der Spitze auf tiefe Frequenzen. Diese »Tonleiter«-Anordnung nutzen auch die Implantate; sie reizen den Hörnerv über eine Reihe von Elektroden, die an einem Silikonfaden aufgereiht sind. Das Frequenzspektrum wird dementsprechend – je nach Hersteller der Geräte – in 8 bis 22 Kanäle unterteilt; jedem davon entspricht eine Elektrode.

Diese Zahl erscheint im Vergleich zu den 5000 inneren Haarzellen des gesunden Ohrs wenig, aber mehr Kanäle verbessern das Sprachverständnis leider kaum. Denn die vergleichsweise großen Elektroden stimulieren stets mehrere Nervenzellen, die Aufteilung nach Frequenzen wird dadurch unscharf. Wenn es gelänge, diese Reizgeber näher an die Zellen heranzubringen, ließe sich die Wahrnehmung von Tonhöhen sicher verbessern. Weniger Probleme bereitet die Lautstärke, deren Umfang bei jedem Patienten individuell angepasst wird. Zwar hat der Hörnerv mit etwa 10 bis 20 Dezibel (dB) einen kleineren Dynamikbereich als das gesunde Ohr, das Schalldruckpegel von 0 bis maximal 120 dB registrieren kann. Der Prozessor überträgt dennoch



einen Umfang von 80 dB, indem er das Eingangssignal auf den Dynamikbereich des Hörnervs komprimiert.

Je früher einem Patienten nach der Ertaubung ein Implantat eingesetzt wird, desto günstiger ist die Prognose. Selbst taub geborene Kinder haben sehr gute Aussichten, Hören und Sprechen zu lernen, wenn sie das Gerät frühzeitig erhalten. Insbesondere im Alter von ein bis zwei Jahren reift das Gehör, der Spracherwerb entfaltet sich in dieser Zeit besonders stark.

Nach der Implantation sind Hörtraining und Sprachtherapie besonders wichtig. Menschen, die jahrelang taub waren, profitieren in der Regel weniger, weil der Hörnerv mit der Zeit degeneriert, wenn er nicht stimuliert wird. Die Mehrheit der Patienten versteht Sprache nach einigen Wochen oder Monaten Training; etwa jeder zweite kommt danach ohne Lippenlesen aus und kann telefonieren.

Einen vollständigen Ersatz für das komplexe biologische System geben Cochlea-Implantate freilich nicht. Sie vermitteln derzeit noch keinen normalen Höreindruck. In Zukunft sollen aber spezielle Algorithmen das Sprachverständnis optimieren und selbst Musikgenuss möglich sein. ◁

Guido Reetz arbeitet bei MED-EL, einem Hersteller von Cochlea-Implantaten.

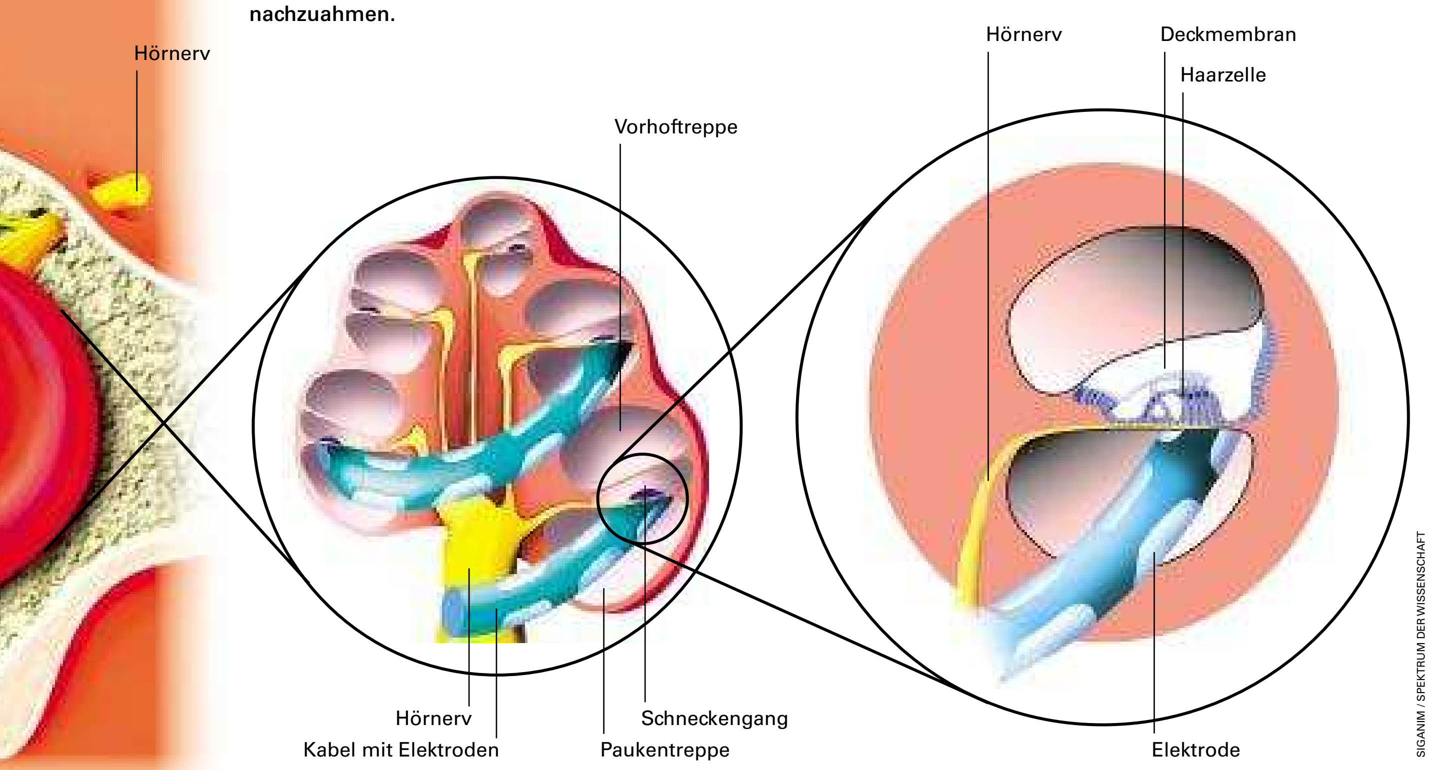
WUSSTEN SIE SCHON?

▶ **Das Gehör Gesunder** spricht bei Schallpegeln zwischen 0 und 20 Dezibel (dB) an, bei leichtem Hörverlust betragen die Schwellen schon 20 bis 30 dB. Zum Vergleich: Wir sprechen typischerweise mit 40 bis 60 dB. Bei hochgradigem Hörverlust wird Schall erst ab 60 bis 90 dB wahrgenommen – der obere Wert entspricht dem Lärmpegel direkt an einer Autobahn. Kommt nun trotz Hörgerät ein geringes Sprachverständnis hinzu, ist ein Cochlea-Implantat angebracht.

▶ Um **Störgeräusche und Sprache** voneinander zu trennen, eignet sich neben trickreicher Verarbeitung auch eine den natürlichen Verhältnissen nahe Methode: Die Versorgung beider Ohren mit zwei Implantaten. Das ermöglicht Richtungshören und nutzt die Möglichkeiten des besten aller Sprachprozessoren, des Gehirns, optimal. Dieses Verfahren ist aber kostspielig, sodass weltweit nur etwa 500 Menschen mit zwei Cochlea-Implantaten ausgestattet sind, davon leben etwa 300 in Europa.

▶ **Gehörlosen-Verbände** weisen darauf hin, dass Erwachsene, die taub geboren worden sind oder vor dem Spracherwerb ertaubten, Lautsprache auch mit einem Cochlea-Implantat nicht mehr erlernen würden. Ihnen ermögliche nur die Gebärdensprache eine der Lautsprache gleichwertige Kommunikation. Gehörlosen muss bei Bedarf ein Dolmetscher für Gebärdensprache zur Verfügung gestellt werden, etwa bei beruflichen Anlässen oder Behördenbesuchen.

Das Ohr empfängt Schallwellen und leitet sie über das Trommelfell zu den Gehörknöchelchen im Mittelohr. Deren Bewegungen erzeugen Druckwellen, die in der Hörschnecke (Cochlea) die feinen Härchen der Hörzellen auslenken. Dieser mechanische Reiz wird dann in elektrische Impulse umgesetzt. Mit Elektroden versuchen Implantate dieses Prinzip nachzuahmen.



Die Bedrohung durch stille Erdbeben

Nicht immer muss der Boden erzittern, wenn sich die Spannung an einer Scherzone plötzlich entlädt. Gefahr droht dennoch; denn obwohl die lautlosen Beben selbst kaum Schäden anrichten, können sie riesige Flutwellen und schwere Erdstöße auslösen.

Von Peter Cervelli

Anfang November 2000 fand auf der Insel Hawaii das stärkste Erdbeben seit mehr als einem Jahrzehnt statt. Rund 2000 Kubikkilometer Gestein am Südhang des Vulkans Kilauea bewegten sich en bloc in Richtung Meer und setzten die Energie eines Bebens der Stärke 5,7 frei. Betroffen war auch das Gebiet unterhalb eines Aussichtspunktes, zu dem täglich Tausende von Touristen strömen, um einen Blick auf einen der spektakulärsten Lavaströme der Insel zu werfen. Doch den Erdrutsch bemerkte niemand – selbst den Seismologen entging er.

Wie konnte er übersehen werden? Einfach deshalb, weil er ohne jegliche Erschütterung ablief. Tatsächlich weiß man inzwischen, dass der Boden nicht immer erzittern muss, wenn sich – wie bei Erdbeben üblich – Gesteinsblöcke ruckartig an Störungslinien entlang verschieben. Der Vorfall am Kilauea war eines der ersten »stillen« Beben, das sich eindeutig dokumentieren ließ.

Noch bis vor kurzem ahnte niemand etwas von der Existenz solcher Ereignisse. Auch ich hätte dieses Beben nicht entdeckt, würde nicht ein Netz hochempfindlicher Instrumente, installiert vom Vulkan-Observatorium des Geologischen Dienstes der USA auf Hawaii, alle Veränderungen am Kilauea kontinuierlich aufzeichnen. Und so erkannte ich, dass die Südflanke des Vulkans um ganze zehn Zentimeter entlang einer Verwerfung im Untergrund verrutscht war. Aber ich sah zugleich, dass diese Bewegung annähernd 36 Stunden gedauert hatte, also geradezu im Schneckentempo abgelaufen war. Bei



Ein riesiger Erdsturz als Folge eines stillen Erdbebens könnte eine mehrere hundert Meter hohe Welle erzeugen, die benachbarte Küsten überflutet (unten).

DAVID FIERSTEIN

normalen Erdbeben schnellen die gegenüberliegenden Seiten der Verwerfungsfläche nämlich in wenigen Sekunden aneinander vorbei – so rasant, dass seismische Wellen entstehen, die den Boden rumpeln und wackeln lassen.

Gefahr riesiger Flutwellen

Nur weil ein Erdbeben langsam und ruhig vonstatten geht, ist es aber keineswegs unbedeutend. Meinen Mitarbeitern und mir war sofort klar, dass das Ereignis am Kilauea Vorbote einer kommenden Katastrophe sein könnte. Falls derselbe riesige Körper aus Gestein und Schutt sich wieder in Bewegung setzen und zu einem gewaltigen Erdrutsch entwickeln würde, bei dem er sich endgültig vom Rest des Vulkans losrisse und ins Meer stürzte, wären die Folgen verheerend.

Wenn Tausende von Kubikkilometern Erde auf einmal ins Wasser plumpsen, erzeugen sie turmhohe Wellen: so genannte Tsunamis. Diese könnten sich von Hawaii aus über den gesamten Pazifik ausbreiten und die Küstenorte rundum bedrohen. Ein dramatischer Flankenabbruch an einer Vulkaninsel stellt daher eine potenzielle weltweite Gefahr dar. Allerdings ist die Wahrscheinlichkeit dafür glücklicherweise gering.

Tatsächlich sind stille Erdbeben, so beunruhigend ihre Entdeckung auf den ▷

▷ ersten Blick wirken mag, letztlich wohl mehr Segen als Fluch. So sollten die Instrumente zu ihrer Aufzeichnung Frühwarnungen ermöglichen. Detaillierte Erkenntnisse darüber, wie es zu solchen Rutschungen kommt, liefern zudem aussichtsreiche Ansätze für Maßnahmen, einen Flankenabbruch zu verhindern. Und schließlich gibt es stille Erdbeben auch in Gebieten, in denen keine Gefahr besteht, dass eine komplette Vulkanseite wegbricht. Dort verhelfen sie zu Einsichten, die dazu beitragen sollten, ihre weniger harmlosen Verwandten – die schweren seismischen Erschütterungen – zuverlässiger vorherzusagen.

Unerwartet schnelle Bodenbewegung

Auf die stillen Erdbeben und ihre Verbindung mit dramatischen Abbrüchen von Vulkanflanken stießen meine Mitarbeiter und ich eher zufällig, als wir andere Naturgewalten erforschten. Zerstörerische Erdstöße und Vulkanausbrüche sind in Japan und an der Pazifikküste im Nordwesten der USA, wo tektonische Platten entlang so genannter Subduktionszonen tief ins Erdinnere abtauchen, eine stete Bedrohung. Zu Beginn der 1990er Jahre fingen Geologen an, ausgedehnte Netze von kontinuierlich aufzeichnenden GPS-Empfängern in seismisch gefährdeten Regionen und an den Hängen aktiver Vulkane wie dem Kilauea zu installieren. Indem diese Instrumente Signale der mehr als dreißig Navigationssatelliten des Global Positioning System auffangen, können sie ihre eigene Position auf der Erdoberfläche zu jeder beliebigen Zeit auf wenige Millimeter genau berechnen.

Als die Wissenschaftler die GPS-Empfänger aufstellten, erwarteten sie zwei Dinge damit zu »sehen«: das langsame, stetige Wandern der tektonischen Platten, aus der die Erdschale besteht, und die ziemlich rasanten Gesteinsverschiebungen bei Erdbeben und Vulkanausbrüchen. Zur allgemeinen Überraschung registrierten die Instrumente aber teils auch geringfügige Bewegungen des Untergrunds, die sich nicht mit einer seismischen Erschütterung oder einem Vulkanausbruch in Verbindung bringen ließen.

Als die Forscher dieses Wandern in einer Karte darstellten, ähnelte das resultierende Muster stark der charakteristischen Verschiebung an Bruchzonen bei Erdbeben: Alle GPS-Stationen auf einer Seite einer hypothetischen Scherlinie bewegten sich einige Zentimeter in die gleiche Richtung. Dies wäre nichts Besonderes gewesen, wenn sich das Muster erst nach ein bis zwei Jahren gezeigt hätte; denn ein derart langsames »Kriechen« einer Verwerfung kannten die Geologen schon länger. Doch die mysteriöse Bewegung war einige hundert Mal so schnell und erreichte Geschwindigkeiten von mehreren Zentimetern pro Tag. Zudem unterschied sie sich durch eine weitere Eigenschaft vom Kriechen der Verwerfungen: Sie erfolgte nicht kontinuierlich, sondern in einzelnen Schüben, die recht plötzlich begannen und endeten. Auch darin glich sie eher einem Erdbeben.

Wenn eine solche relativ schnelle Bewegung am Hang einer Vulkaninsel einsetzt, könnte sie den dramatischen Abbruch einer Flanke einleiten. Erdbeben ereignen sich meist an Störungszonen mit eingebauten Bremsen: Die Bewegung kommt zum Stillstand, sobald die Spannung zwischen den beiden Erdschollen, die aneinander entlangschrammen, abgebaut ist. Dagegen lässt die Gravitation im Verlauf der Bewegung nicht nach. Wenn sie die Haupttriebfeder ist, kann also im schlimmsten Fall der Teil des Vulkans oberhalb der schrägen Bruchfläche so instabil werden, dass die einmal begonnene Rutschung nicht mehr aufhört und die gesamte Seite des Berges von der Schwerkraft nach unten gezogen wird, ins Meer stürzt und an dessen Grund schließlich zu einem riesigen Schuttfächer zerfällt.

Reibung als Notbremse

Für diese Art von Kollaps müssen die Hänge ziemlich steil sein. Vulkane können stark geneigte Flanken entwickeln, wenn wiederholte Ausbrüche relativ zähflüssiger Lava den Kegel schneller auftürmen, als die Erosion ihn abflachen kann. Am Kilauea trifft dies offenbar zu. Die Entdeckung eines stillen Erdbebens beweist, dass sein Südhang in Bewegung ist – und vielleicht irgendwann abreißt.

Noch wirkt die Reibung entlang der Bruchfläche wie eine Notbremse. Doch die Frage ist, ob sie der Schwerkraft auf Dauer standhält. In vielen anderen Fällen in der Vergangenheit hat sich die Gravitation letztlich durchgesetzt. So liefern Sonaraufnahmen riesiger Schuttfächer im Flachwasser rund um Vulkaninseln in aller Welt – darunter auch die Kanaren – schon seit langem Hinweise auf einstige Flankenabbrüche. Mehr als 25 solcher Bergstürze gab es auf der Inselkette von Hawaii in den vergangenen fünf Millionen Jahren – geologisch gesehen ein Augenblick.

Im typischen Fall stürzt dabei vielhundertmal so viel Gestein ins Meer, wie bei der Eruption des Mount St. Helens im Mai 1980 vom Gipfel abbrach und sich zu Tal wälzte – mehr als genug für verheerende Tsunamis. Auf der Hawaii-Insel Lanai entdeckten Geologen 325 Meter über dem Meeresspiegel Haufen zertrümmerter Korallen. Nach Gary M. McMurtry von der Universität von Hawaii in Manoa ist die wahrscheinlichste Erklärung dafür eine wahrhaft gigantische Flutwelle, die bis in diese Höhe vordrang und die Kalkschalen dort deponierte. Die gewaltigsten Tsunamis, die in historischer Zeit registriert wurden, waren nur ein Zehntel so hoch.

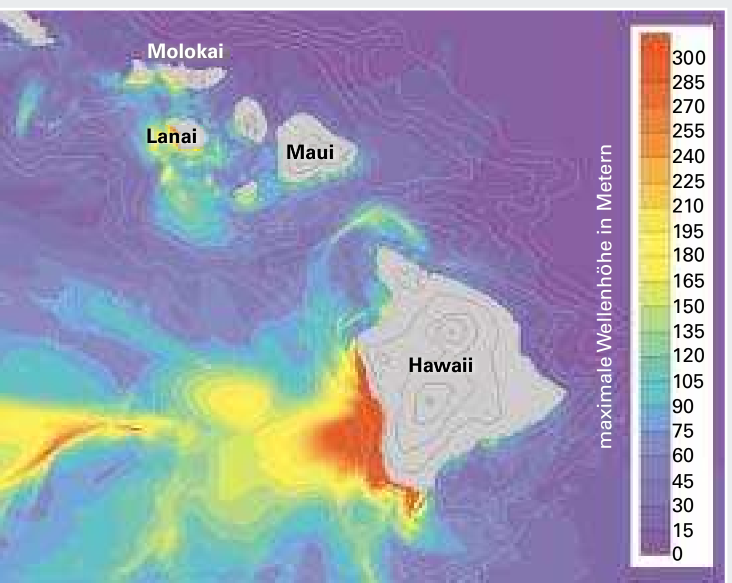
So erschreckend diese Aussagen auch wirken mögen, ist die Gefahr, nüchtern und aus der angemessenen Perspektive betrachtet, doch relativ gering. Der dramatische Abbruch von Vulkanhängen kommt im Zeitrahmen eines Menschenlebens praktisch nicht vor. Allerdings ▷

IN KÜRZE

- Nicht alle Erdbeben lassen den Boden schwanken. Manchmal löst sich die Spannung an einer **Scherzone** nicht ruckartig in Sekunden, sondern durch sanftes Gleiten innerhalb von Stunden bis Tagen.
- Stille Erdbeben, die am Rand von **Vulkaninseln** auftreten, bergen das Risiko von Flankenabbrüchen, bei denen die Kraterwand ins Meer stürzt und **turmhohe Tsunamis** auslöst.
- Stille Erdbeben an **Subduktionszonen**, wo eine tektonische Platte unter eine andere abtaucht, können starke Erdstöße nach sich ziehen.
- An anderen Stellen dürfte das lautlose Gleiten jedoch die **Gefahr verheerender Erdbeben** senken, weil es an Störungszonen, die kurz vor dem gewaltsamen Aufbrechen stehen, Spannung abbaut.

Gigantische Erdrutsche und verheerende Tsunamis

Nord-Kauai-Sturz
Kaena-Rutsch
Nuuanu-Sturz
Kauai
Wailau-Rutsch
Oahu
Molokai
Süd-Kauai-Sturz
Hana-Rutsch
Lanai
Maui
Waianae-Rutsch
Kahoolawe
Clark-1-Sturz
Nord-Kona-Sturz
Pololu-Rutsch
Hawaii
Clark-2-Sturz
Alika-2-Sturz
Mauna Loa
Alika-1-Sturz
Süd-Kona-Sturz
Hilina-Rutsch
0 1000 2000 3000 4000 5000 6000
Wassertiefe in Metern
0 100 200
Entfernung in Kilometern



Gewaltige Schuttfächer (oben, rot umrandet) vor den Küsten der Hawaii-Inseln machen deutlich, dass in der Vergangenheit mehrfach große Teile der dortigen Vulkane abgebrochen und ins Meer gestürzt sind. Nach Meinung einiger Geologen erzeugte der Bergsturz Alika 2 eine enorme Flutwelle, die an den benachbarten Küsten noch in über 300 Meter Höhe Gesteinstrümmer und zerbrochene Muschelschalen ablagerte.

Nach den Ergebnissen einer Computersimulation (links) könnte die Tsunami-Woge bis zu 300 Meter hoch gewesen sein. Für kurze Zeit teilte sie wahrscheinlich die Insel Maui in zwei Hälften.

▷ tritt er viel öfter auf als der verheerende Einschlag eines großen Asteroiden oder Kometen. Zu einem Flankenabbruch, der gewaltig genug ist, um eine gefährliche Flutwelle zu erzeugen, kommt es auf den Hawaii-Inseln etwa alle 100 000 Jahre. Nach Schätzung einiger Wissenschaftler dürfte ein solches Ereignis weltweit durchschnittlich einmal in 10 000 Jahren stattfinden. Dann freilich drohen extreme Zerstörungen. Deshalb erscheinen Überwachungs- und Vorsorgemaßnahmen durchaus angebracht.

Aus diesem Grund installieren Geowissenschaftler derzeit Netze von permanent arbeitenden GPS-Empfängern auf instabilen Vulkaninseln, um kritische Gesteinsbewegungen zu entdecken. Das gilt etwa für Réunion im Indischen Ozean, Fogo innerhalb der Kapverden im Atlantik und alle Galápagos-Inseln im Ostpazifik. Am Kilauea sind mehr als zwanzig GPS-Stationen in Betrieb. Sie haben bereits belegt, dass hier außer großen, zerstörerischen Erdbeben immer wieder auch lautlose Rutschungen stattfinden. Nach Ansicht einiger Wissenschaftler bewahren mehrere submarine Haufen aus Schlamm und Gestein – wahrscheinlich Schutt vergangener Flankenabbrüche – den Kilauea momentan vor einem katastrophalen Kollaps, indem sie seinen Südhang abstützen.

Chance auf Früherkennung

Sollte das unmerkliche Abrutschen tatsächlich in einen verheerenden Abbruch übergehen, müsste sich die Bewegung des Hanges rasant beschleunigen. Im schlimmsten Fall geschähe das derart schnell, dass keinerlei Chance auf Früherkennung und Warnung bestünde. Im besten Fall jedoch liefe die Beschleunigung ruckweise ab – in Form einer Serie stiller Erdbeben, die sich allmählich intensivieren. Mit einem Netz von GPS-Stationen wären diese sich steigernden Rutschungen leicht zu entdecken – lange bevor sie so stark werden, dass der Boden zu wanken beginnt. Mit etwas Glück käme eine Tsunami-Warnung dann vielleicht noch früh genug.

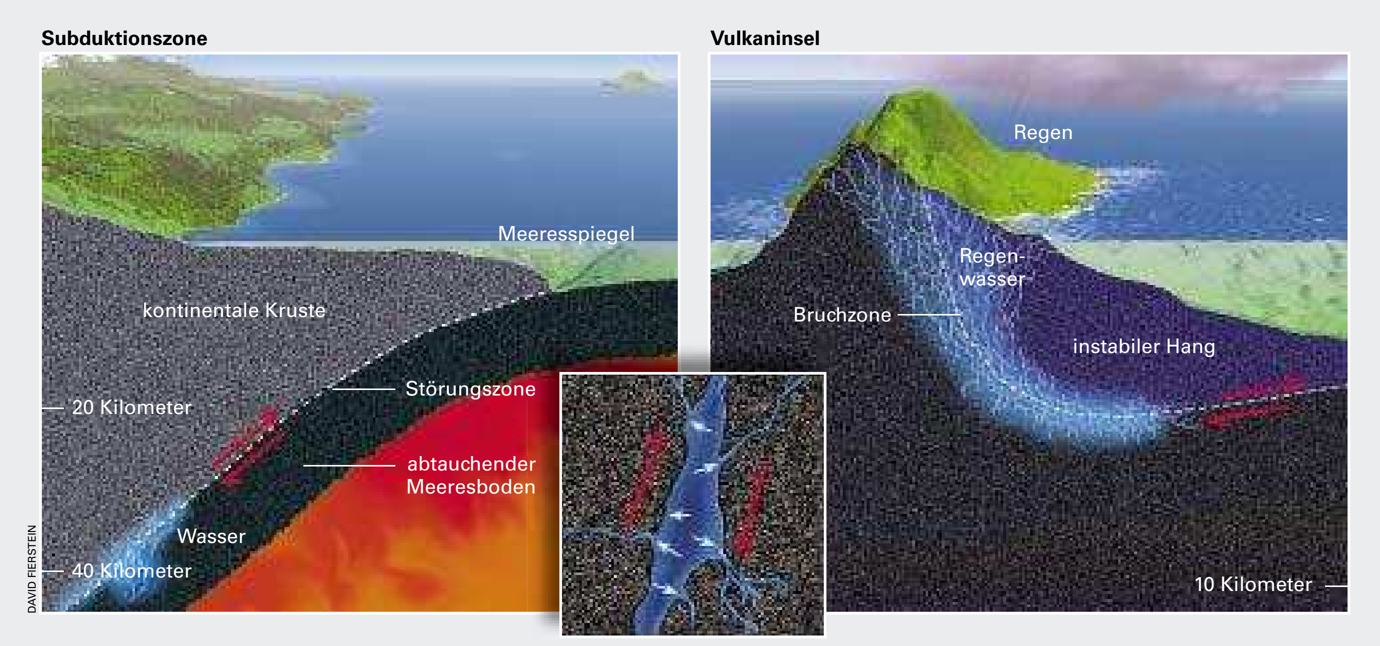
Dennoch bleibt die Situation kritisch. Bei einem gewaltigen Abbruch würden ein paar Stunden oder sogar Tage Vorwarnzeit vermutlich nicht ausreichen, weil es kaum gelingen dürfte, die große Zahl von Betroffenen in so kurzer Frist zu evakuieren. Deshalb stellt sich die Frage, ob sich ein drohender Abbruch vielleicht auch im Vorfeld verhindern ließe. Die Antwort lautet: im Prinzip ja. In der Praxis könnte der Versuch jedoch am zu großen Aufwand scheitern.

Denkbar wäre, in einem Mammuteinsatz einfach den oberen Bereich einer instabilen Vulkanflanke so weit abzutragen, dass die Reliefenergie unter den kritischen Schwellenwert sinkt. Viel billiger, aber auch riskanter wäre es, mit einer Serie kleinerer künstlicher Erdbeben zu versuchen, den Hang kontrolliert abrutschen zu lassen, bevor er steil genug für einen katastrophalen Abbruch geworden ist. Dabei würden sich die Forscher, um einem Kollaps vorzubeugen, dieselben Kräfte zu Nutze machen, die derzeit die stillen Erdbeben am Kilauea auslösen.

Neun Tage vor dem jüngsten Abrutschen dort fielen bei einem wolkenbruchartigen Regenguss in weniger als 36 Stunden mehr als tausend Millimeter Niederschlag. Schon lange weiß man, dass in Störungszonen einsickerndes

Wie stille Erdbeben entstehen

Wasser könnte stille Erdbeben auslösen, wenn es in eine anfällige Störungszone vordringt. Da es durch die Last des darüber liegenden Gesteins unter hohem Druck steht, kann es sich in den Spalt an der Bruchfläche zwängen und ihn erweitern (kleines Bild). So verringert es die Haftreibung zwischen den benachbarten Gesteinsblöcken und erleichtert ihnen, aneinander vorbeizugleiten.



Kristallwasser, das aus Mineralen in dem abtauchenden ehemaligen Meeresboden herausgepresst wird, kann entlang der Grenze zwischen den beiden tektonischen Platten nach oben wandern.

Regenwasser kann in eine dicht unter der Oberfläche gelegene Bruchzone einsickern, die beispielsweise die instabile Flanke eines Vulkans von seinem Zentralbereich trennt.

Wasser Erdbeben auslösen kann. Nach Schätzungen der Geologen braucht Regenwasser auf dem Kilauea ungefähr neun Tage, um sich seinen Weg durch die Risse und Poren des zerklüfteten Basaltgesteins bis zu einer Tiefe von fünf Kilometern zu bahnen – wo die Gleitbewegung bei stillen Erdbeben stattfindet. Dort schmiert die Flüssigkeit dann gleichsam die Bruchfläche und verringert die Reibung zwischen den benachbarten Gesteinsblöcken.

Heikle Maßnahme zum Entschärfen der Gefahr

Der offenkundige Zusammenhang zwischen Wolkenbruch und stillem Erdbeben bestärkt die Verfechter der umstrittenen Idee, Wasser oder Dampf in Störungszonen an der Basis einer instabilen Flanke zu pressen, um gezielt Rutschungen auszulösen, durch die sich der Hang langsam absenkt und seine potenzielle Energie vermindert. Zu solchen induzierten Rutschungen kommt es in sehr kleinem Maßstab ständig bei geothermischen Kraftwerken und anderen Anlagen, die gezielt oder unabsichtlich Wasser in den Boden drücken.

Doch bei Vulkanen gleicht die Methode einer halsbrecherischen Gratwanderung: Man muss es schaffen, genau die richtige Menge Flüssigkeit an der richtigen Stelle einzuführen, um nicht versehentlich den Kollaps selbst zu erzeugen, den man eigentlich vermeiden will. Einige Geophysiker spielten schon mit dem Gedanken, auf diese Weise kontrolliert Spannung entlang der berüchtigten San-Andreas-Störung in Kalifornien freizusetzen. Doch letztlich schreckten sie vor dem Risiko zurück.

Obwohl stille Erdbeben eine wichtige Rolle bei Flankenabbrüchen spielen, reicht ihre Bedeutung viel weiter. Ihre Entdeckung zwingt auch dazu, die gängigen Vorstellungen über die Vorgänge an Bruchzonen zu überdenken – was die Beurteilung seismischer Risiken einschließt. Im Nordwesten der USA, nahe der Pazifikküste, haben Forscher inzwischen viele lautlose Rutschungen an der Verwerfungszone der Kaskadenkette beobachtet, die zwischen der Nordamerikanischen Platte und der abtauchenden Juan-de-Fuca-Platte verläuft. Eine seltsame Eigenschaft der stillen Erdbeben dort ist, dass sie in regelmäßigen Abständen stattfinden – weshalb es inzwischen sogar möglich ist, sie vorherzusagen.

Ihr periodisches Auftreten rührt höchstwahrscheinlich daher, dass Wasser, das von unten empordringt, Ort und Zeitpunkt dieser lautlosen Rutschungen entscheidend mitbestimmt. Je tiefer die abtauchende Platte ins Erdinnere vorstößt, desto höheren Temperaturen und Drücken ist sie ausgesetzt. Unter diesen Bedingungen entweicht eine bedeutende Menge Kristallwasser, das in Mineralen eingeschlossen war. Es sammelt sich und bahnt sich dann schwallweise seinen Weg nach oben. Wenn es dabei den Spalt an der Bruchzone ein wenig auseinander drückt, könnte es ein stilles Erdbeben auslösen (siehe Kasten links).

Vor genau einem Jahr berichteten Garry Rogers und Herb Dragert vom Geologischen Dienst Kanadas sogar über einen Zusammenhang zwischen diesen lautlosen Rutschungen und messbaren, wenngleich sehr schwachen seismischen Erschütterungen. Die stillen Beben ereignen sich in bestimmten Intervallen in großen Tiefen. Dabei bestimmt ihre Häufigkeit und Intensität, wie schnell sich Spannung in den höheren Bereichen der Verwerfungszone aufbaut, die sich dann in ruckartigen Verschiebungen entlädt. Normalerweise dauert es ein Jahr oder länger, bis genügend Spannung für einen messbaren Erdstoß zusammenkommt. Rogers und Dragert meinen jedoch, dass eine lautlose Rutschung diese Zeit auf ein bis zwei Wochen abkürzen könnte. Demnach sollte in den Wochen und Monaten danach die Wahrscheinlichkeit für ein normales Erdbeben deutlich erhöht sein.

Neubewertung des Erdbebenrisikos

Auch in anderen Teilen der Welt ist das Bebenrisiko neu zu bewerten. Zum Beispiel gibt es in Japan so genannte seismische Löcher, in denen schon ungewöhnlich lange kein Erdstoß mehr stattgefunden hat. Nach gängiger Einschätzung wäre ein verheerendes Erdbeben hier überfällig. Doch falls stille Rutschungen an den betreffenden Scherflächen quasi unbemerkt Spannung abgebaut haben, ist die Gefährdung in Wahrheit vielleicht viel geringer als gedacht. Desgleichen sollte man bisher als inaktiv eingestufte Störungszonen genauestens auf verborgene lautlose Rutschungen untersuchen, um festzustellen, ob an ihnen vielleicht doch bislang übersehene Verschiebungen auftreten, die einmal ein verheerendes Erdbeben auslösen könnten.

Die Erkenntnis, dass Gesteinsblöcke an Bruchflächen mit vielerlei Geschwindigkeiten aneinander entlanggleiten können, stellt die Theoretiker vor eine große Herausforderung. Sie macht es sehr viel schwieriger, den Verwerfungsprozess mit grundlegenden physikalischen Prinzipien zu beschreiben. Nach heutiger Ansicht lassen sich Häufigkeit und Stärke der beobachteten Erdbeben mit einem ziemlich einfachen Reibungsgesetz erklären. Gilt das auch für ihre lautlosen Pendants? Bislang gibt es darauf keine endgültige Antwort.

Das ist auch nicht verwunderlich – schließlich steckt die Erforschung der stillen Erdbeben erst noch in den Anfängen. Doch die Mühe lohnt sich. Die detaillierte Aufklärung des subtilen Phänomens verspricht eine Fülle neuer Erkenntnisse darüber, wie und warum sich an Störungszonen die Gesteinsblöcke verschieben – eine Frage, deren Bedeutung sich nicht hoch genug einschätzen lässt. Denn je nach Art und Geschwindigkeit der Bewegung an Bruchflächen können – teils auch in großer Entfernung – immense Schäden auftreten. Die Kenntnis der stillen Erdbeben eröffnet einen völlig neuen Blickwinkel auf den Scherprozess und erlaubt, ihn in allen Geschwindigkeitsbereichen detailliert zu erforschen. ◁

AUTOR UND LITERATURHINWEISE



Peter Cervelli ist Geophysiker und leitet das Krusten-Deformations-Projekt am Vulkan-Observatorium auf Hawaii, das sich am Rand der Caldera des Kilauea befindet. Er ist verantwortlich für die Interpretation der Messdaten eines Netzes von fast fünfzig Instrumenten, welche alle möglichen Bewegungen und Verformungen des Bodens an den beiden aktivsten Vulkanen der Insel messen: dem Mauna Loa und dem Kilauea. Cervelli entdeckte das stille Erdbeben an der Südflanke des Kilauea während seiner Doktorarbeit, die er 2001 an der Universität Stanford (Kalifornien) abschloss.

Giant landslides, mega-tsunamis, and paleo-sea level in the Hawaiian islands. Von G. M. McMurtry et al. in: Marine Geology, Bd. 203, S. 219; 30.1.2004

Episodic tremor and slip on the Cascadia subduction zone: the chatter of silent slip. Von G. Rogers und H. Dragert in: Science, Bd. 300, S. 1942; 20.6.2003

Sudden aseismic fault slip on the south flank of Kilauea volcano, Hawaii. Von P. Cervelli et al. in: Nature, Bd. 415, S. 1014; 28.2.2002

Weblinks zu diesem Thema finden Sie bei www.spektrum.de unter »Inhaltsverzeichnis«.

Die Ursachen der Eifersucht

Sind Männer eher wegen sexueller Fehltritte eifersüchtig, Frauen dagegen wegen emotionaler Abkehr des Partners? Evolutionspsychologen halten das für plausibel. Doch neue Studien widerlegen diese Auffassung.

Von Christine R. Harris

Als Clara Harris ihren Mann in flagranti ertappte, geriet sie in so rasende Wut, dass sie ihn gleich mehrmals hintereinander mit dem Auto überfuhr. Vor kurzem verurteilte ein texanisches Gericht die »Mercedes-Mörderin« zu zwanzig Jahren Haft.

Eifersucht rangiert unter den ersten Hauptmotiven für Mord. Seit Menschengedenken bot der quälende, oft fatale Gemütszustand Stoff für Geschichten und Kunstwerke. Auch die Psychologie setzte sich seit ihren Anfängen mit dieser Grundmotivation auseinander, allen voran der Begründer der Psychoanalyse Sigmund Freud (1856–1939). Eine Reihe weiterer Forschungsansätze zur Eifersucht ließe sich aufzählen. Erschöpfend wird die Wissenschaft die komplexe Motivation und ihre Auswirkungen sicherlich nie erfassen können.

Seit rund zehn Jahren verfolgt eine kleine Fraktion von Forschern, darunter David Buss von der Universität von Texas in Austin, einen neuen Ansatz, der auf der so genannten evolutionären Psychologie oder »Evolutionspsychologie« fußt. Diese relativ neue Forschungsrichtung, ein Abkömmling der Soziobiologie, leitet sich vom Evolutionskonzept von Charles Darwin (1809–1882) her. Für ihre Erklärungsansätze interessieren sich zunehmend diverse Wissenschaftszweige, die sich mit menschlichem Verhalten befassen.

Ist für Männer Liebe sekundär?

Die Grundidee betreffs Eifersucht ist, dass dieses Gefühl – wie viele andere Reaktionsmuster des Menschen auch – eine alte biologische Wurzel hat. So erklärt sich nach Auffassung der Evolutionspsychologen auch die Funktion dieses Zustands in Liebesbeziehungen: Weil die Regung, sich Untreue des Partners zu Herzen zu nehmen und sich möglichst dagegen zu wehren, unseren Urahnen zu erfolgreicher Fortpflanzung verhalf, ihnen also einen Fitnessvorteil brachte, entstand dafür bald ein erbliches neuronales Modul – ein Satz von Gehirnschaltkreisen, der anspringt, wenn eine Geschlechtsbeziehung gefährdet erscheint.

Die Forscher nehmen außerdem an, dass Männer und Frauen in den Urgemeinschaften unterschiedlichen Selektionsdrücken ausgesetzt waren. Entsprechend würden sich auch ihre Muster der Eifersucht geschlechtsspezifisch ausprägen. Und zwar schlage das männliche Modul besonders bei sexueller Untreue der Gefährtin, das weibliche hingegen vor allem bei emotionaler Abtrünnigkeit des Partners Alarm und wecke Eifersucht. Für den Mann wäre demnach ein Seitensprung der Frau die größere Katastrophe, für die Frau wäre es viel gravierender, wenn der Partner sich anders verliebte.

Den Unterschied erklären die Evolutionspsychologen mit den postulierten traditionellen Geschlechterrollen im Fortpflanzungsgeschäft: Wenn der Mann Kinder aufziehen hilft, die nicht seine eigenen sind, verschenkt er seine Kräfte. Ganz sicher kann er sich seiner Vater-

Aus urheberrechtlichen Gründen können wir Ihnen die Bilder leider nicht online zeigen.

AKG BERLIN / MUNCH MUSEUM – THE MUNCH ELLINGSEN GROUP / VG BILD-KUNST BONN 2004

»Eifersucht« nannte der norwegische Künstler Edvard Munch (1863–1944) dieses Ölbild, das er um 1894/95 malte. Seit längerem untersucht die Forschung die biologischen Wurzeln dieser Emotion.

schaft aber nie sein – also sollte er sein Augenmerk so gut er kann darauf richten, dass die Frau ihm treu bleibt. Umgekehrt weiß die Frau, dass ein Kind ihr eigenes ist. Um es großzuziehen, braucht sie aber die Unterstützung des Gefährten, das heißt hauptsächlich seine emotionale Zuwendung.

Jahrelang schienen evolutionspsychologische Studien zur geschlechtsspezifischen Eifersucht diese Thesen zu bestätigen. Doch einige neuere Arbeiten der Psychologie wecken den Verdacht, dass der angenommene Unterschied vielleicht gar nicht existiert. Meines Erachtens erklärt sich Eifersucht zwar vielleicht wirklich aus unserer Evolution, nur dürften die treibenden Kräfte komplexer und subtiler gewesen sein.

Die Studien, die unterschiedliche Formen der Eifersucht bei Männern und Frauen aufzeigten, folgten weit gehend einem ähnlichen Untersuchungsschema. Meist waren Studenten die Teilnehmer. Sie sollten sich vorstellen, was schlimmer für sie wäre: wenn der oder die Geliebte mit jemand anderem Sex hätte oder sich in jemand anderen verliebte?

Der ersten solchen Erhebung, die eine Gruppe um Buss 1992 durchführte, sind über zwei Dutzend weitere ähnliche Untersuchungen in mehreren Ländern gefolgt. In den USA offenbarte die Methode fast immer in gleicher Weise eine klare geschlechtsspezifische Tendenz: Durchgehend meinten mindestens 70 Prozent der Frauen, sie würden emotionale Untreue schmerzhafter erleben, während zwischen 40 und 60 Prozent der Männer glaubten, sexuelle Untreue sei für sie das Schlimmere.

Emotionale Untreue für Frauen schmerzhafter

Beim Durchforsten dieser Daten fand ich, dass dieser deutliche, wenn auch nicht besonders krasse Geschlechtsunterschied bei älteren Versuchsteilnehmern offenbar geringer wird. Gleiches scheint für Homosexuelle zu gelten. Interessant ist der Vergleich mit außeramerikanischen Ländern: Europäische und asiatische Studien ergaben zwar auch geschlechtsspezifische Muster, jedoch empfanden hier viel weniger der Männer sexuelle Untreue als das schlimmere Übel. In einigen der Befragungen äußerten sich so nur 25 oder 30 Prozent. Der kulturelle Hintergrund scheint sich demnach auf die Bewertung ebenso stark auszuwirken wie eine mögliche geschlechtsspezifische Disposition.

Existiert ein angeborener Geschlechtsunterschied für Eifersucht gar nicht? Beispielsweise könnten Männer und Frauen bei der Vorstellung, der Partner werde ihnen untreu, schlicht anderes über dessen Seelenzustand folgern. Das könnten ganz unterschiedliche Bilder sein. Vielleicht as- ▷



▷ soziieren Männer etwa bei einem Verhältnis der Frau nur leichter als umgekehrt, dass sie den anderen Mann tatsächlich auch liebt, während Frauen möglicherweise eher dazu neigen zu glauben, beim Mann würden Seitensprünge nicht zwangsläufig mit Liebe zur Nebenbuhlerin einhergehen.

Leider liefern die erwähnten Studien hierzu kein eindeutiges Ergebnis. Nur ein Teil der Arbeiten brachte Daten, die für einen Einfluss derartiger Gedankenbilder sprechen könnten. Die anderen Arbeiten ergaben keinen solchen Hinweis. Das lässt annehmen: Offenbar sind für Eifersucht Vorstellungen über die Beteiligung von Liebe bei sexuellen Verhältnissen nicht egal, doch sie scheinen die unterschiedliche Reaktionsweise von Männern und Frauen nicht allein zu bestimmen.

David DeSteno und seine Kollegen von der Northeastern University in Boston (Massachusetts) konstruierten einen Eifersuchtstest, bei dem der Einfluss der Gedankenbilder etwas zurückgedrängt werden und die angeborene Komponente damit mehr in den Vordergrund treten sollte. Die Versuchsteilnehmer sollten sich wiederum vorstellen, ob sie sich über emotionale oder über sexuelle Untreue mehr ärgern würden. Nur mussten sie sich gleichzeitig siebenstellige Zahlen merken. Ihre Gedanken waren sozusagen teilweise mit anderem ausgelastet, konnten sich also nicht so gründlich mit der Testaufgabe beschäftigen. Sie antworteten gewissermaßen spontaner. Die Angaben der Männer änderten sich infolge der erschwerten Bedingungen nicht.

Bei den Frauen allerdings verschob sich das Verhältnis. Viel mehr Frauen als vorher hielten nun sexuelle Abtrünnigkeit für das schlimmere Übel, bei dem sie mehr Eifersucht empfinden würden. Offensichtlich hatten die Frauen vorher tatsächlich weniger »aus dem Bauch heraus« geantwortet. Ob sie sich dabei etwa überlegt hatten, dass eine Affäre bei einem Mann nicht gleich etwas Ernstes zu bedeuten haben muss, oder ob sie sich bemüht hatten, ihrem eigenen Wunschbild von sich selbst gerecht zu werden, bleibt offen.

Andere Antwortmuster als in den herkömmlichen Studien kamen auch bei Tests zu Stande, in denen die Teilnehmer nicht zwischen emotionaler und sexueller Untreue wählen mussten, sondern auf zwei getrennten Skalen ankreuzten, wie stark ihre Eifersucht jeweils sein würde. Nun trat die geschlechtsspezifische Reaktionsart erstaunlicherweise so gut wie gar nicht mehr auf. Teilweise glaubten sogar durchschnittlich mehr Frauen als Männer, am eifersüchtigsten würden sie bei sexueller Untreue sein.

Aus diesen Vergleichen folgt: Vielleicht ist die Übereinstimmung mit den Erwartungen des evolutionspsychologischen Eifersuchtsmodells nur oberflächlich, wenn Männer und Frauen in den psychologischen Auswahltests unterschiedlich antworten. Vielleicht sind die geschlechtsspezifischen Reaktionen keineswegs angeboren. Die Verhaltensmuster könnten genauso gut auf einer mehr gedanklichen Leistung, also einem kognitiven Vorgang, basieren.

Sexuelle Gefühle statt Eifersucht?

Um die Unsicherheiten von Befragungstests zu umgehen, versuchte das Team von Buss, bei Studenten Eifersucht in den beiden imaginären Situationen physiologisch an Hautwiderstand und Herzschlag zu messen. Das Ergebnis passte zu den Erwartungen der evolutionspsychologischen These: Bei den Männern stiegen die Werte beider Parameter stärker, wenn sie sich vorstellen sollten, ihre Partnerin habe Sex mit jemand anders. Die Frauen reagierten eher heftiger bei dem Gedanken, der Freund habe sich in jemand anders verliebt.

Allerdings kann die physiologische Erregung bei den unterschiedlichsten Gefühlen steigen. Deswegen erlauben auch Lügendetektoren nur begrenzt Schlüsse. Blutdruck, Herzschlag und Schwitzen nehmen nicht nur bei Angst oder Ärger zu. Möglicherweise beruhte die Reaktion in diesen Studien, bei denen die Studenten an Seitensprünge dachten, auf einer völlig anderen Emotion, vielleicht sogar

IN KÜRZE

▶ Evolutionspsychologen halten Eifersucht in der Paarbeziehung für eine Emotion, die unter **Selektionsdruck** entstand. Sie dient, so die These, der **Fortpflanzung** und erfolgreichen Kinderaufzucht. Angeborenermaßen tritt sie deswegen bei den Geschlechtern in unterschiedlichen Situationen auf.

▶ Neue, verfeinerte Studien finden den **Geschlechtsunterschied** nicht bestätigt. Demnach könnte Eifersucht eine viel **allgemeinere biologische Basis** haben. Möglicherweise entstand das Gefühl zunächst bei Geschwisterrivalität.

einfach auf sexueller Erregung. Diesen Verdacht weckten Studien der Arbeitsgruppe von James Grice von der Southern Illinois University in Carbondale und meines Teams an der Universität von Kalifornien in San Diego.

Bei unseren eigenen Messungen wuchs die physiologische Erregung der Männer im gleichen Grade, wenn sie sich ausmalten, sie würden mit ihrer Freundin schlafen, und wenn sie sich die Freundin beim Sex mit einem anderen Mann vorstellten. Bei den Frauen schien die Reaktion auch mit der Vorerfahrung zusammenzuhängen: Diejenigen, die sexuelle Beziehungen erlebt hatten, reagierten bei der Vorstellung sexueller Untreue des Partners physiologisch heftiger als wenn sie sich ausmalten, der Freund liebe eine andere. Die Reaktionsmuster dieser Gruppe glichen eher denen der getesteten Männer.

Zwangsläufig haben Laborstudien bei einer so schwierigen Motivation ihre Grenzen. Auch über geschlechtsspezifische Eifersucht und ihre Auswüchse sozusagen in natürlichen Situationen liegt eine Reihe von wissenschaftlichen Arbeiten vor. Als Argument für Unterschiede dieser Motivation bei Männern und Frauen führen manche Forscher gern eifersuchtsbedingte Gewalttaten an. Sie beobachten in den verschiedensten Kulturen geschlechtseigene Muster solchen aggressiven Verhaltens.

Der drastischste Fall ist der Mord. Als Forscher der McMaster-Universität in Hamilton (Ontario, Kanada) vor zwanzig Jahren die Statistiken von Tötungsdelikten sichteten, schlossen sie aus den Zahlen, dass mehr Männer als Frauen jemanden aus Eifersucht wegen sexueller Untreue umbringen. Allerdings verüben Männer allgemein viel mehr Gewalttaten, und auch Morde, als Frauen – was die Aussage verfälschen könnte. Vor einigen Jahren erfasste Richard B. Felson von der State University von New York in Albany das Tatmotiv von über 2000 Morden in den USA. Heraus kam, dass Frauen im Verhältnis der von ihnen begangenen Morde doppelt so oft aus Eifersucht töteten wie Männer. Ich selbst habe kürzlich die Hintergründe von über 5000 in verschiedenen Kulturen verübten Morden verglichen (Grafik unten). Demnach wurden Frauen bezogen auf ihre Tötungsdelikte insgesamt genauso oft aus Eifersucht zu Mördern wie Männer.

Verlieben wiegt schwerer als sexuelle Untreue

Wie erleben Menschen Untreue des Partners im wahren Leben, auch wenn sie nicht gleich zum Verbrecher werden? Zwei neuere Studien ergaben, dass beide Geschlechter in der Situation durchaus ähnlich empfinden. So konnte eine Umfrage unter Studenten keinen geschlechtsspezifischen Unterschied aufzeigen. Ähnlich die zweite Studie: Dass sie sich besonders wegen des emotionalen Engagements des Partners gekränkt gefühlt hatten, tiefer noch als wegen sexueller Untreue, berichteten in einer Untersuchung meines Labors Männer genauso wie Frauen quer durch die Altersgruppen, gleich ob sie hetero- oder homosexuell waren (siehe Kasten S. 56).

Gar nicht so selten leiden Menschen unter krankhafter Eifersucht, unter einem Eifersuchtswahn. Dann kommen sie nicht von der – oft nur eingebildeten – Vorstellung los, dass der Partner sie betrüge, und meinen überall Anzeichen für seine Seitensprünge zu entdecken. Zwanghaft müssen sie ihn ständig überwachen und ihm nachspionieren. Um den anderen am Fremdgehen zu hindern, sind manchen Betroffenen alle Mittel recht – bis hin zum Einsperren.

Eifersuchtswahn scheint bei Männern fast doppelt so häufig vorzukom- ▷

Afrika (sechs Volksstämme)
Kanada
Indien
Polen
Schottland
USA (Alabama)
USA (Baltimore)
USA (Detroit)
USA (Manhattan)
USA (Miami)
USA (Philadelphia)
Männer, nicht aus Eifersucht
Männer, aus Eifersucht
Frauen, nicht aus Eifersucht
Frauen, aus Eifersucht
0 100 200 300 400 500 600
Anzahl Morde, aufgeschlüsselt nach Täter und Mordmotiv
TOM DUNNE / AMERICAN SCIENTIST

Entgegen früherer Erhebungen morden Frauen aus Eifersucht genauso häufig wie Männer – sofern man die Vergehen auf die Gesamtzahl der jeweils von Männern beziehungsweise Frauen verübten Morde bezieht.

▷ men wie bei Frauen. Eine frühere Studie schloss daraus auf eine Veranlagung zu sexuell bedingter Eifersucht bei Männern, die es bei Frauen so nicht gibt. Zu bedenken ist aber, dass eine Reihe mentaler Krankheiten sich nicht auf beide Geschlechter gleich verteilt. Unter anderem sind Männer beispielsweise viel öfter von sexuellen Zwangsstörungen betroffen als Frauen.

Die australischen Psychiater Gordon Parker und Elaine Barrett von der Universität von New South Wales in Sydney vermuten, dass es sich auch beim Eifersuchtswahn oft um eine Zwangserkrankung handelt. Nicht selten schlägt die Behandlung mit Fluoxetin, einem Serotonin-Wiederaufnahmeblocker, gut an. Bei Zwangsstörungen ist das eine bewährte Therapie.

Nur am Rande: Männer leiden dreimal so oft wie Frauen unter Ordnungs- und Symmetriewahn. Niemand würde daraus schließen, dass das männliche Geschlecht von Natur aus ordentlicher sei als das weibliche.

Warum passen die Antworten von Studenten, die sich Eifersucht nur vorstellten, zum Postulat der Evolutionspsychologie von angeborenen geschlechtsspezifischen, in Urzeiten entstandenen Verhaltensmechanismen, warum dagegen reale Eifersuchtserlebnisse anscheinend nicht? Ich könnte mir verschiedene Erklärungen für die Diskrepanz der Befunde denken, die einander nicht ausschließen müssen, in jedem Fall aber den weiteren Forschungsbedarf anzeigen.

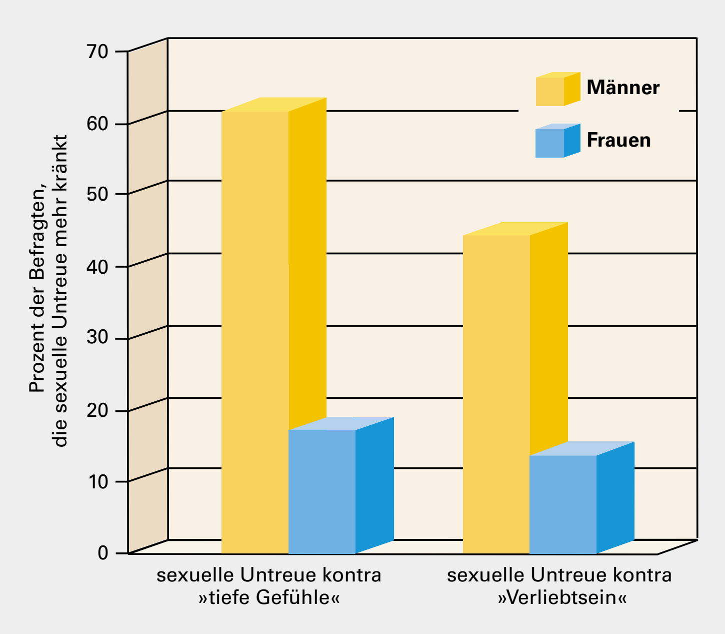
Unbekannte steinzeitliche Sitten

Gesicherte Erkenntnisse über das soziale und kulturelle Umfeld unserer frühen Vorfahren gibt es fast gar keine. Möglicherweise hatten diese Menschen in ihren kleinen sozialen Verbänden weniger Gelegenheit zu Seitensprüngen, als die Evolutionspsychologen in ihren Modellen ansetzen, zumindest sicherlich wesentlich weniger als heutige Städter. Schwer zu beweisen ist auch, ob der Beitrag der Männer zur Kinderaufzucht wirklich so entscheidend war wie meist angenommen. Davon hinge aber der postulierte Selektionsdruck auf angeborene geschlechtsspezifische Eifersucht ab. In heutigen Jäger-Sammler-Kulturen ist dieser Beitrag durchaus unterschiedlich, wie Wendy Wood von der Duke-Universität in Durham (North Carolina) und Alice Eagly von der Northwestern-Universität in Evanston (Illinois) aufzeigten. In manchen ursprünglichen Gesellschaften steuern sogar die Frauen das meiste zum Unterhalt der Kinder bei.

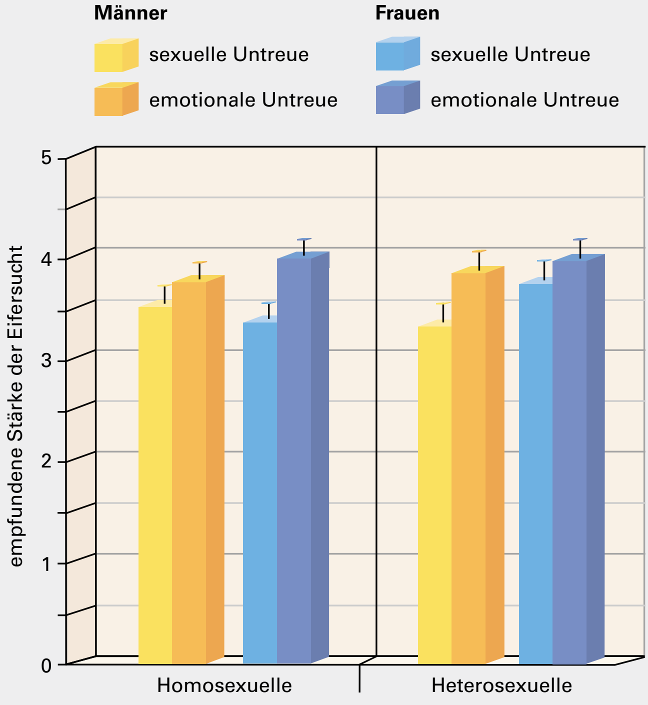
Aber selbst wenn Untreue einstmals für den Partner einen großen Verlust an wertvollen Ressourcen bedeutete – hinsichtlich der Evolution und der Selektionskräfte, die auf eine möglichst große Verbreitung der eigenen Gene hinwirken, ließen sich sinnvollere Wege denken als ein Verhaltensmechanismus, der erst nach vollbrachter Tat anspringt. Der evolutionspsychologischen Auffassung zufolge soll aber der mächtigste Auslöser für männliche Eifersucht Geschlechtsverkehr sein, für weibliche dagegen Verliebtsein. Forscher haben ver-

Die Lebenserfahrung

Eine Studie der Autorin ergab, dass sich die Gründe für Eifersucht von Männern und Frauen ähneln (rechte Grafik). In dieser Befragung berichteten die Teilnehmer von Eifersuchtserlebnissen bei Kränkungen in einer Partnerbeziehung.



Klassischen Studien mit konstruierten Situationen zufolge geht es bei der Eifersucht von Männern am meisten um sexuelle Handlungen der Partnerin, bei der von Frauen eher um innere Zuwendung und Liebe des Partners zu einer anderen.



Im wirklichen Leben ähneln sich Männer und Frauen in ihrer Eifersucht. Es kränkt sie mehr, wenn der Partner starke Gefühle für eine dritte Person empfindet. Sexuelle Untreue allein wühlt beide Geschlechter nicht ganz so sehr auf.

TOM DUNNE / AMERICAN SCIENTIST

Der Pavianmann wird das paarungsbereite Weibchen nicht aus den Augen lassen und jeden Kontrahenten bekämpfen. Seine Kinder versorgt er allerdings nicht.


MIT FREUNDL. GENEHMIGUNG VON SUSAN ALBERTS, DUKE UNIVERSITY

schiedentlich nachgewiesen, dass Eifersüchtige Untreue meistens richtig erkennen – nachdem sie stattgefunden hat. Zu dem Zeitpunkt hätte das den Urzeitmenschen nicht mehr viel genützt, sofern letztlich die Nachkommen das sind, was zählt.

Gleich einzuschreiten, sobald sich ein neues Verhältnis des Partners gerade erst anbahnt, wäre für unsere Vorfahren hinsichtlich ihrer Nachkommenschaft die effektivere Strategie gewesen. Sicherlich sendeten die Beteiligten auch damals schon zunächst Signale ihres Interesses, ähnlich wie heute. Um den Treuebruch zu verhindern, hätte es bei beiden Geschlechtern genügt, auf kleinste Zeichen von Flirten und Koketterie zu achten. Eine angeborene geschlechtsspezifische Eifersuchtsstrategie wäre dann gar nicht notwendig gewesen.

An dieser Stelle kommen einem Tierbeobachtungen in den Sinn. Bei nicht wenigen Tierarten, darunter auch eine Reihe von Primaten bis hin zum Schimpansen, bewachen die Männchen sexuell bereite Weibchen regelrecht. Sie folgen ihnen pausenlos und begatten sie in der Zeit wiederholt, lassen aber kein anderes Männchen in die Nähe der Partnerin. Gern führen Evolutionspsychologen solches Verhalten im Tierreich an, wenn sie erklären möchten, dass die männliche Eifersucht besonders auf sexuelle Untreue anspricht.

Dennoch ist die Situation beim Menschen in manchem völlig anders. Im Gegensatz zu den allermeisten Tieren sind Menschenfrauen auch außerhalb der empfänglichen Phase paarungsbereit, und ihre Empfängnisbereitschaft ist äußerlich nicht zu sehen. Auch helfen die Männchen vieler der betreffenden Tierarten nicht bei der Jungenaufzucht. Die einzelnen Primaten verhalten sich in dieser Hinsicht sehr unterschiedlich. Männchen südamerikanischer Arten sind oft treu sorgende Väter. Afrikanische und asiatische Affenmännchen bemühen sich im Allgemeinen wenig um ihren Nachwuchs. Von den Menschenaffen bilden nur die Gibbons feste Paare. Interessanterweise verjagen Gibbonweibchen Geschlechtsgenossinnen von vornherein aus ihrem Revier. Sie warten nicht erst, ob das andere Weibchen sich an ihren Partner heranmacht.

Eifersucht ist ein beliebtes Thema des Volkstheaters. Viel Situationskomik entsteht dadurch, dass jemand, der eigentlich in festen Händen ist, sichtlich dem offenen Charme einer fremden Person verfällt, während der Partner den Flirt wütend aus einem Versteck beobachtet und sich dann mit unpassenden und völlig übersteigerten Verhaltensweisen lächerlich macht. Solche Szenen geben den Stücken ein wenig sexuelle Würze.

Vorbeugung: Begehrliche Blicke schüren die Wut

Die Emotionspsychologie hält Erklärungen bereit, wieso schon ein kokettes Lächeln oder ein Augenklappern beim anderen Partner dermaßen heftige eifersüchtige Emotionen hervorrufen können: Der Betreffende bewertet unwillkürlich, ob ihm aus dem, was er da wahrnimmt, irgendeine Gefahr erwachsen könnte. Bei Eifersucht wird der Rivale als jemand eingeschätzt, der etwas einem selbst Wertvolles bedroht.

Von dem amerikanischen Psychologen Richard S. Lazarus von der Universität von Kalifornien in Berkeley stammt ein übergreifendes Emotionsmodell, nach dem die Person bei einem Ereignis zunächst beschließt, ob die Situation günstige, ungute oder vielleicht irrelevante Folgen haben könnte. Bei ungünstiger Prognose veranschlagt sie den potenziellen Schaden und überlegt dann Gegenmaßnahmen.

Diese Vorstellung habe ich an die Eifersucht zu adaptieren versucht. Meines Erachtens kann schon eine Kleinigkeit ein vages, vielleicht noch nicht einmal bewusstes Gefühl von Bedrohung wecken. Vielleicht war es nur ein Seitenblick des Ehemanns auf die wiegende Hüfte eines hübschen Mädchens, vielleicht einfach eine freundliche Geste zwischen dem oder der Liebsten und einer dritten Person. Insoweit könnte die Empfindung auf einem angeborenen Mechanismus beruhen. Möglicherweise gibt es Ähnliches bei Tieren. Das Gefühl aktiviert die Motivation für Handlungen, welche die bedrohliche Liaison unterbinden.

Beim Menschen, zumindest bei Erwachsenen, dürfte aber noch die kognitive Komponente hinzukommen. Den Grad der Eifersucht und ihre Richtung bestimmt unter anderem sicherlich mit, welche Konsequenzen einer solchen Liebschaft für einen selbst man sich ausmalt. Das kann bei jedem anders sein und beruht wesentlich auf sozialen und kulturellen Erfahrungen. Wie bei anderen Emotionen auch, etwa beim Zorn, basiert das Gefühl der Eifersucht nach diesem Modell also einerseits auf einem angeborenen, sozusagen im Gehirn fest ▷

MIT FREUNDL. GENEHMIGUNG VON SYBIL HART, TEXAS TECH UNIVERSITY / AMERICAN SCIENTIST



▷ verdrahteten Anteil, andererseits auf dem eigenen Selbstverständnis. Und das reflektiert in komplexer Weise kulturelle Gegebenheiten.

Diese Sichtweise steht nicht im Widerspruch zu der evolutionspsychologischen These, Eifersucht bei Paaren habe die adaptive Funktion im evolutionären Sinne, eine Partnerbeziehung zu erhalten – ein Nutzen, der beide Geschlechter betrifft. Auch die Reflexion und das daraus resultierende Handeln kann eine nützliche Anpassung sein, weil auch diese kognitive Beteiligung dem Erhalt der jetzigen oder einer zukünftigen Verbindung dienen kann.

Eifersucht zuerst unter Geschwistern?

Ein Ansatz, der Eifersucht in dieser Weise als einen allgemeinen Mechanismus der Psyche ansieht, ist dehnbar und weit genug, um auch kulturelle Unterschiede einzubeziehen. Zudem erlaubt er, das Phänomen auch außerhalb der Partnerschaft zu behandeln. Es gibt schließlich auch Eifersucht zwischen Freunden oder zwischen Geschwistern. Das Gefühl, welches sie empfinden, kann durchaus ähnlich sein wie bei einem Zerwürfnis in einer geschlechtlichen Beziehung.

Möglich erscheint sogar, dass sich die Eifersucht ursprünglich gar nicht im Kontext zwischen Mann und Frau entwickelte. Genauso gut könnte sie der Rivalität zwischen Geschwistern entsprungen sein, die ja von Natur aus um die Zuwendung der Eltern konkurrieren. Im Tierreich ist das Phänomen häufig zu beobachten. Vögel bringen Nestgeschwister sogar um. Genauere Studien etwa an Primaten könnten möglicherweise den Ursprung der Eifersucht beim Menschen erhellen.

In letzter Zeit befasste sich die Eifersuchtsforschung hauptsächlich mit Konflikten bei Erwachsenen. Über die Entwicklung der Motivation in der Kindheit ist durch neuere Forschung wenig bekannt. Die Wissenschaft interessiert sich bisher vor allem für das verstörte Gebaren älterer Geschwister, wenn ein neues Baby zur Welt kommt. Tatsächlich scheinen die Eltern die Verzweiflung des Kindes oft mitzuverschulden, indem sie es unfreundlicher behandeln und weniger beachten als den Neuankömmling.

Doch auch unabhängig davon entsteht Eifersucht bei Kindern offenbar allein dadurch, dass die Eltern sich einem anderen Baby zuwenden. Wie Sybil Hart von der Texas-Tech-Universität in Lubbock und ihre Kollegen aufzeigten, machen Kinder – die keine Geschwister haben – schon mit sechs Monaten ein weinerliches Gesicht, wenn sich die Mutter mit einer lebensechten Babypuppe beschäftigt. Hantiert die Mutter in gleicher Weise mit etwas anderem, schauen sie längst nicht so missmutig drein. Acht Monate alte Kinder, deren Mutter mit einem anderen Kind spielt, protestieren und versuchen, die mütterliche Aufmerksamkeit auf sich zu lenken.

Zu vermuten ist, dass diese Verhaltensäußerungen bei Kleinkindern noch nicht unbedingt mit komplexeren kognitiven Vorgängen einhergehen. Erst später gewinnen bei der Eifersucht die eigenen Vorstellungen an Bedeutung. Das zeigten Studien von Sonia Masciuch von der University of Alberta und von Kim Kienapple von der Mount Saint Vincent University in Halifax (beides Kanada). In den allerersten Jahren reagieren Kinder gleichermaßen verstört, egal wie alt das andere Kind ist, mit dem ihre Mutter spielt. Vierjährige dagegen protestieren am heftigsten, wenn dieses Kind so alt ist wie sie selbst. Babys bedeuten für sie offenbar weniger Konkurrenz.

In dem Zusammenhang stellt sich die Frage, ob der emotionale Ausdruck der Kinder überhaupt echte Eifersucht ausdrückt oder schlicht ein unspezifisches Missbehagen anzeigt. Auch was Erwachsene betrifft, bleibt noch zu klären, ob es sich dabei um eine elementare Gefühlsqualität handelt oder aber um eine Mixtur mehrerer unliebsamer Emotionen. Es könnte sogar sein, dass dieses Empfinden einfach Beiwerk für bestimmte soziale Situation ist. Wenn die einzelnen Forschungsstränge zusammenwachsen, könnte daraus eine neue Definition von Eifersucht erwachsen. ◁

▲ Ein halbes Jahr ist dieses Kind erst alt, und schon zeigt es Unmut, als die Mutter sich mit einer Babypuppe abgibt. Vielleicht entstand Eifersucht überhaupt aus solchen Rivalitätsgefühlen bei Kindern.

AUTORIN UND LITERATURHINWEISE



Christine R. Harris ist Psychologieprofessorin an der Universität von Kalifornien in San Diego.

A review of sex differences in sexual jealousy, including self-report data, psychophysiological responses, interpersonal violence, and morbid jealousy. Von Christine R. Harris in: Personality and Social Psychology Review, Bd. 7, S. 102, 2003

A cross-cultural analysis of the behavior of women and men: Implications for the origins of sex differences. Von W. Wood und H. A. Eagly in: Psychological Bulletin, Bd. 128, S. 699, 2002

Weblinks zu diesem Thema finden Sie bei www.spektrum.de unter »Inhaltsverzeichnis«.

KOSMOLOGIE

Galaktische Wände und Blasen

Die neuesten Karten des Kosmos enthalten Hunderttausende von Galaxien. Ihre räumliche Verteilung zeigt große Strukturen, deren Ursprung in Fluktuationen der Materiedichte liegt, die schon unmittelbar nach dem Urknall vorhanden waren.

Von Michael A. Strauss

Noch in den 1970er Jahren war die Kosmologie – die Erforschung des Universums als ein Ganzes – eine hochspekulative Angelegenheit, die kaum mit Fakten brillieren konnte. Das hat sich in den vergangenen zwei Jahrzehnten durch neue Beobachtungsbefunde und theoretische Arbeiten grundlegend geändert: Die Kosmologie ist inzwischen zu einem exakten Forschungszweig innerhalb der Astrophysik geworden. Sie ruht nun auf einem soliden theoretischen Fundament, das durch eine Fülle von Daten abgesichert ist. Das Urknall-Modell, demzufolge das Universum vor rund 14 Milliarden Jahren aus einem extrem dichten und heißen Anfangszustand heraus entstanden ist und seither expandiert, erklärt die Bewegung der Galaxien, die Häufigkeiten der Elemente Wasserstoff und Helium sowie die Eigenschaften der kosmischen Hintergrundstrahlung.

Inzwischen haben die Kosmologen die nächste Hürde genommen. Sie glauben zu verstehen, wie die großräumigen Strukturen im Kosmos entstanden sind. Tatsächlich stimmt die Verteilung von Galaxien, die man im Rahmen von ehrgeizigen Himmelsdurchmusterungen wie etwa dem seit 1998 laufenden Sloan Digital Sky Survey (SDSS) ermittelt hat, hervorragend mit theoretischen Vorhersagen überein. Wir verfügen also nun über ein kohärentes Modell, in dem sich die Entwicklung der kosmischen Strukturen von den ersten winzigen Dichtefluktuationen unmittelbar nach dem Urknall bis zur heute sichtbaren Galaxienverteilung verfolgen lässt.

Das Universum weist Strukturen aller Größenordnungen auf. Die Sterne sind nicht gleichmäßig im Raum verteilt, sondern gruppieren sich zu Galaxien. So ist unsere Sonne einer von mehreren hundert Milliarden Sternen des Milchstraßensystems, unserer Galaxis, das die Form einer flachen Scheibe und einen Durchmesser von 100 000 Lichtjahren hat. Unser Milchstraßensystem wiederum ist nur eine von Abermilliarden Galaxien im beobachtbaren Universum. Das nächste große Sternsystem ist rund zwei Millionen Lichtjahre von uns entfernt. Aber auch die Galaxien sind nicht wie die Rosinen in einem Kuchen auf zufällige Weise im Kosmos verteilt: Zwischen fünf und zehn Prozent von ihnen bilden Haufen, die innerhalb eines Volumens von einigen Millionen Lichtjahren Durchmesser bis zu tausend Sternsysteme enthalten. Lange Zeit dachten die meisten Astronomen, Galaxienhaufen wären die größten zusammenhängenden Strukturen im Kosmos. Während Sterne zu Galaxien gehören und viele Galaxien zu Haufen, schienen die Haufen keine noch größeren Einheiten zu bilden. Diese Vorstellung passte gut zum theoretischen Verständnis vom Urknall.

Als Einstein erstmals seine Allgemeine Relativitätstheorie auf das Universum als Ganzes anwendete, machte er vereinfachende Annahmen: Das Universum sollte im Mittel homogen und isotrop sein, also keine größeren »Klumpen« enthalten und in allen Richtungen gleich aussehen. Einstein nannte diese Voraussetzungen das »kosmologische Prinzip«. Dieses bildet die Grundlage für alle modernen Modelle des Universums.

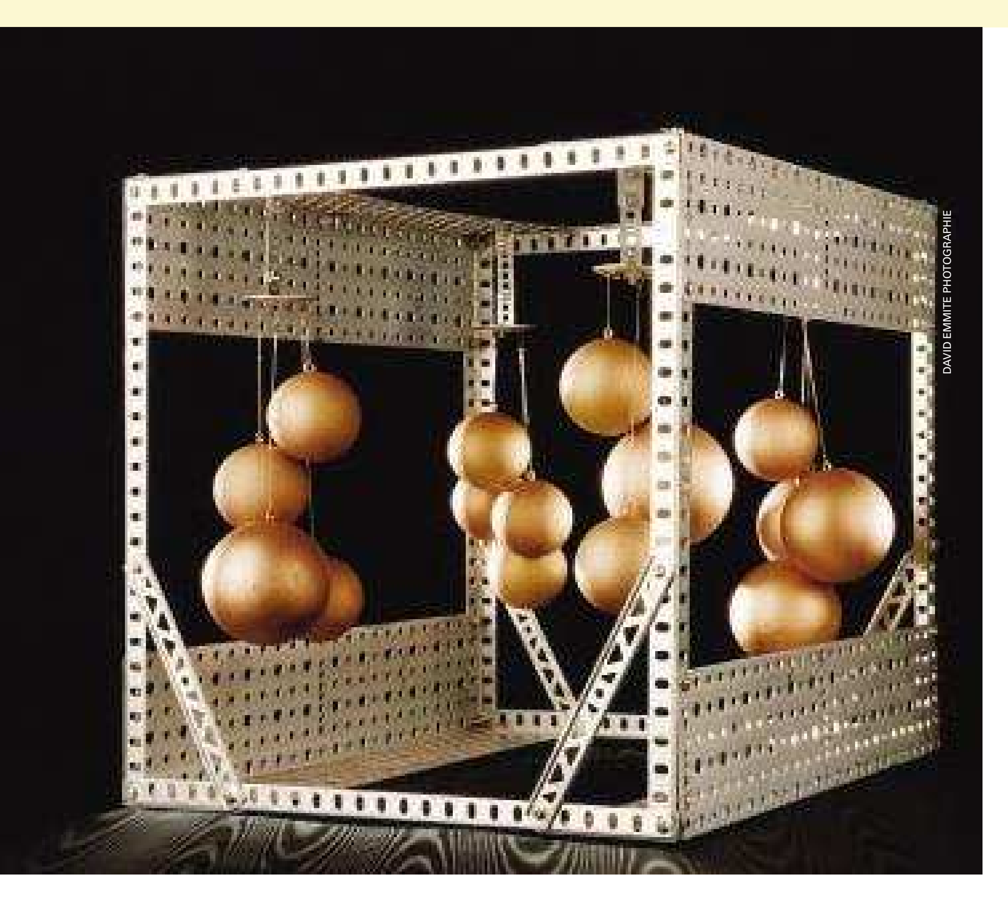
SERIE

Der beschleunigte Kosmos

Im Mai-Heft
Teil I: Die Symphonie der Schöpfung

> **Im Juni-Heft**
Teil II: Galaktische Wände und Blasen

Im Juli-Heft
Teil III: Dunkle Energie und verborgene Dimensionen



◀ **Materie ist im Universum nicht gleichmäßig verteilt. Selbst auf Größenskalen von Millionen Lichtjahren ist eine komplexe Struktur nachweisbar.**

Um die Gültigkeit dieses Prinzips auf Skalen zu überprüfen, die größer sind als Galaxienhaufen, benötigen wir die dritte Dimension – wir müssen für weit entfernte Galaxien nicht nur ihre zweidimensionalen Koordinaten am Himmel, sondern ihre räumlichen Positionen im Raum kennen. Der Blick durch ein Fernrohr zeigt uns zwar Sterne, Planeten und Galaxien am Firmament – aber ohne zusätzliche Informationen wissen wir nicht, ob diese Himmelskörper klein und nahebei oder groß und weit entfernt sind. Glücklicherweise können uns die Teleskope aber auch diese Angaben liefern.

Der Schlüssel, mit dem sich die Entfernungen von Galaxien ermitteln lassen, ist die Expansion des Weltalls. Diese Ausdehnung des Raumes nämlich führt dazu, dass die Galaxien von uns wegzustreben scheinen – und zwar umso schneller, je weiter sie von uns entfernt sind. Die scheinbare Fluchtbewegung manifestiert sich im Spektrum der Galaxien als Rotverschiebung: Die Wellenlänge eines Photons wird gedehnt. Wenn wir nun anhand von Objekten bekannter Entfernung den Zusammenhang zwischen Rotverschiebung und Entfernung bestimmen, so können wir anschließend die auf diese Weise gewonnene Beziehung auf Objekte unbekannter Entfernung anwenden: Wir registrieren ihre Spektren, ermitteln daraus die Rotverschiebung und berechnen daraus schließlich, wie weit sie von uns entfernt sind.

Ende der 1970er Jahre ermöglichte es der Fortschritt in der Fernrohr- und Detektortechnik, die Rotverschiebungen einer großen Zahl von Galaxien zu bestimmen und so räumliche Karten unserer kosmischen Umgebung zu erstellen.

Eine »Große Mauer« im All

Ich erinnere mich noch, dass ich als junger Student einen Artikel von Stephen A. Gregory und Laird A. Thompson im »Scientific American« über diese ersten 3-D-Karten des Universums gelesen habe (siehe »Galaxienhaufen: Superhaufen und Riesenlücken«, Spektrum der Wissenschaft 5/1982, S. 34). Die Autoren berichteten darin von Hinweisen, denen zufolge das kosmologische Prinzip falsch sein könnte: Die Messungen zeigten Strukturen, die viel größer waren als einzelne Galaxienhaufen, sowie riesige Leerräume (englisch: *voids*) mit Durchmessern von zig Millionen Lichtjahren.

Ich war fasziniert. Diese Kartierung des Kosmos und die damit ermöglichte Entdeckung von völlig neuen Strukturen im Universum erschien mir als eines der aufregendsten Dinge, die in der Wissenschaft passierten – und führte so zu meiner heutigen Laufbahn.

Im Jahr 1986 präsentierten Valérie de Lapparent, Margaret J. Geller und John P. Huchra vom Harvard-Smithsonian Center for Astrophysics (CfA) eine Karte, die 1100 Galaxien enthielt. Dies war der Anfang einer großen Himmelsdurchmusterung, die schließlich 18 000 Galaxien umfassen sollte. Dieser Survey bestätigte die Vielfalt und Allgegenwart großer Strukturen. Die Verteilung der Galaxien zeigte eine schaumige Struktur: Die Sternsysteme befinden sich überwiegend in dünnen Filamenten, zwischen denen gewaltige Leerräume klaffen.

Eine der bemerkenswertesten Strukturen, die in dieser kosmischen Karte auftauchte, war die so genannte »Große Mauer«, die sich über 700 Millionen Lichtjahre von dem einen bis zum anderen Ende der untersuchten Region erstreckte. Da die Karte weder Anfang noch Ende der Mauer zeigte, blieb ihre wahre Ausdehnung zunächst unbekannt.

Diese gewaltige Struktur und die Ungewissheit über ihre Ausdehnung nährten die Zweifel an der Gültigkeit des kosmologischen Prinzips. Hatte sich Einstein bei dieser für unser Verständnis des expandierenden Universums so wichtigen theoretischen Grundlage geirrt? Sollte das Universum auch über sehr große Entfernungen gemittelt nicht homogen sein? Offenbar mussten wir eine noch größere Region des Universums durchmustern, um Antworten auf diese Fragen zu finden.

Gemäß dem Urknall-Paradigma sind die heute in der Galaxienverteilung sichtbaren Strukturen aus winzigen Fluktuationen in dem fast perfekt homogenen frühen Universum entstanden. Die anfänglichen Dichteunterschiede zwischen verschiedenen Regionen betrugen lediglich ein hundertstel Prozent, wie sich aus den Temperaturunterschieden in der kosmischen Hintergrundstrahlung ablesen lässt (siehe »Die Symphonie der Schöpfung«, Spektrum der Wissenschaft 5/2004, S. 48). War die Dichte in einer bestimmten Region geringfügig höher ▷

▷ als in ihrer Nachbarschaft, so übte dieser Bereich eine Anziehungskraft auf die umliegende Materie aus – und wuchs so langsam an. Auf diese Weise verloren Regionen geringerer Dichte noch mehr Materie und dünnten stetig weiter aus. Durch diesen Prozess der gravitativen Instabilität wuchsen aus den dichteren Regionen schließlich die heute sichtbaren galaktischen Superhaufen. Die Regionen geringerer Dichte dagegen entwickelten sich zu den riesigen Leerräumen.

Ungefähr zu der Zeit, als die ersten Rotverschiebungssurveys abgeschlossen wurden, stießen die Astronomen auf ein weiteres Problem: Die in den Galaxien sichtbare Materie – Sterne und Gas – macht offenbar nur einen kleinen Teil, nämlich etwa zwei Prozent, der Gesamtmasse des Universums aus. Der überwiegende Teil der Materie verrät sich nur indirekt durch seine Schwerkraft. Die Astronomen schlugen eine ganze Reihe unterschiedlicher Modelle vor, um diese »Dunkle Materie« zu beschreiben. Die Modelle lassen sich in zwei Kategorien unterteilen, »heiße« und »kalte«, und der Unterschied zwischen diesen beiden Kategorien ist entscheidend für die Entwicklung der kosmischen Strukturen.

Im Szenario der Kalten Dunklen Materie (*cold dark matter*, kurz CDM), vorgeschlagen unter anderem von P. James E. Peebles von der Universität Princeton, bilden sich zunächst relativ kleine Strukturen wie Galaxien und Teile von Galaxien. Erst im Laufe der Zeit entstehen daraus unter dem Einfluss der Schwerkraft immer größere Strukturen. In diesem Modell wäre also die Große Mauer erst relativ spät entstanden. Im Szenario der Heißen Dunklen Materie (*hot dark matter*, kurz HDM), eingeführt von Jakow B. Seldowitsch und seinen Kollegen von der Moskauer Staatsuniversität, bewegte sich die Dunkle Materie im frühen Kosmos so schnell, dass sich alle kleineren Strukturen rasch wieder auflösten. Die ersten bleibenden Strukturen waren deshalb große Filamente und Materiewände (englisch: *sheets*) mit Ausdehnungen von bis zu mehreren hundert Millionen Lichtjahren. Erst später bildeten sich in diesen riesigen Strukturen durch Fragmentation die Galaxien. In diesem Modell wäre die Große Mauer also eine alte Struktur aus der Frühzeit des Kosmos.

Ist das »Ende aller Größe« gefunden?

Verbesserte Himmelsdurchmusterungen würden also nicht nur das kosmologische Prinzip von Einstein testen, indem sie die größten Strukturen im Universum identifizierten, sondern zugleich die Art der Dunklen Materie aufklären. Stephen A. Shectman von der Carnegie-Institution in Washington und seine Kollegen führten von 1988 bis 1994 mit dem 2,5-Meter-Teleskop der Sternwarte Las Campanas in Chile einen solchen Survey durch (siehe »Die Struktur des Universums«, Spektrum der Wissenschaft 9/1999, S. 42). Das Team erfasste die Rotverschiebung von 26418 Galaxien in einem Volumen, das erheblich größer war als das des ursprünglichen CfA-Surveys. »Das Ende aller Größe« habe man gefunden, erklärte Teammitglied Robert P. Kirshner: Die Durchmusterung zeigte eine Galaxienverteilung ganz ähnlich wie in der CfA-Durchmusterung, enthüllte aber keine Strukturen, die wesentlich größer waren als die Große Mauer. Einsteins kosmologisches Prinzip schien sich also doch zu bestätigen – der Kosmos ist über riesige Entfernungen hinweg homogen und isotrop.

Freilich war auch das Ergebnis der Las-Campanas-Durchmusterung nicht endgültig, denn sie konnte keine Aussagen darüber liefern, was über Abstände von ein bis zwei Milliarden Lichtjahren hinweg passiert. Das aber ist eine jener Entfernungsskalen, auf denen sich die Bildung von Haufen am einfachsten theoretisch verstehen lässt – doch zugleich sind Strukturen dieser Größenordnung am schwierigsten nachzuweisen. Die Schwankung der Galaxiendichte über solche Entfernungen ist nur gering. Sehr leicht können deshalb schon geringfügige Auswahleffekte eine Häufung von Galaxien vortäuschen.

So nehmen die Astronomen typischerweise Galaxien bis zu einer gewissen Grenzhelligkeit in eine Durchmusterung auf. Wenn sie nun aber die Helligkeit von Sternsystemen in einer bestimmten Region des Himmels überschätzen, dann erhalten sie dort zwangsläufig mehr Galaxien – und laufen so Gefahr, dies als Galaxienhäufung zu interpretieren. Eine ultimative Rotverschiebungsdurchmusterung müsste also nicht nur ein immenses Volumen erfassen, sondern auch genauestens kalibriert sein.

Ende der 1980er Jahre begann ein Team um James E. Gunn aus Princeton sowie Richard G. Kron und Donald G. York von der Universität Chicago ein Projekt vorzubereiten, das diese Aufgabe erfüllen sollte. Die Astronomen wollten die Verteilung der Galaxien in einem bislang unerreicht großen Volumen unter Beachtung der sorgfältigsten Kalibrierung bestimmen. Rund zehn Jahre später begannen endlich die Beobachtungen für diesen Sloan Digital Sky Survey. An dem 80 Millionen Dollar teuren Projekt sind mittlerweile über 200 Astronomen beteiligt. Kernstück des SDSS ist ein Spezialteleskop mit einem Hauptspiegel von 2,5 Meter Durchmesser, das sich in zwei verschiedenen Modi betreiben lässt. In den Nächten mit sehr guten Beobachtungsbedingungen nimmt es mit einer Weitwinkelkamera sorgfältig kalibrierte Bilder in fünf breiten Wellenlängenbereichen auf. Die Kamera benutzt CCDs, hochempfindliche elektronische Detektoren, die sich auf ein Prozent genau kalibrieren lassen.

In Nächten mit Mondschein oder leichter Bewölkung benutzt das Teleskop hingegen ein Paar von Spektrografen, um Spektren – und damit Rotverschiebungen – von jeweils 608 Objekten auf ▷

IN KÜRZE

▶ Die Astronomen betätigen sich als **kosmische Kartografen** und erstellen immer detailliertere räumliche Karten der Galaxien und Galaxienhaufen. Das umfassendste dieser Projekte, der **Sloan Digital Sky Survey**, umfasst insgesamt eine Million Galaxien in Entfernungen von bis zu zwei Milliarden Lichtjahren.

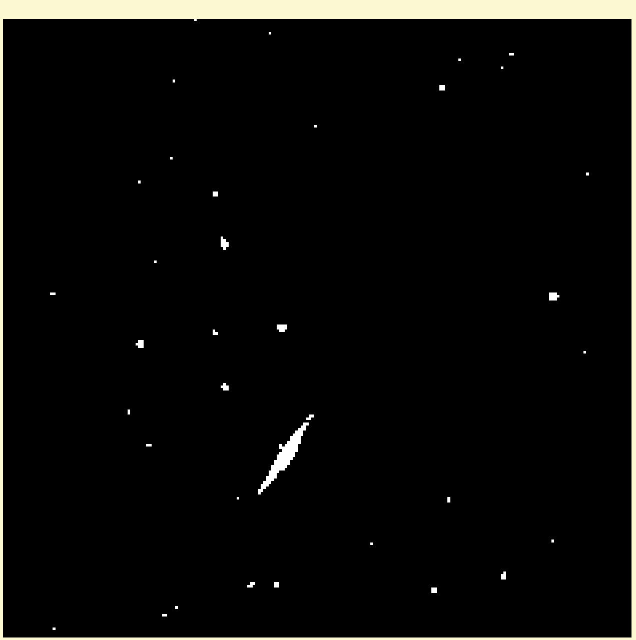
▶ **Die Karten zeigen: Galaxien bilden große Strukturen,** die sich über viele hundert Millionen Lichtjahre erstrecken. Mit Hilfe der Durchmusterungen lassen sich diese Strukturen mit hoher Genauigkeit quantifizieren. Die Ergebnisse stimmen mit dem überein, was die Forscher erwarten, wenn sie die Schwankungen der kosmischen Hintergrundstrahlung in die heutige Zeit extrapolieren. Diese Übereinstimmung belegt, dass die Kosmologen ein konsistentes Bild der kosmischen Entwicklung über die 14 Milliarden Jahre seit dem Urknall besitzen.

Die Durchmusterung des Kosmos in vier (nicht ganz einfachen) Schritten

Der Sloan Digital Sky Survey ist die bislang anspruchsvollste Durchmusterung des Himmels. Das Projekt nutzt ein 2,5-Meter-Teleskop auf dem Apache Point in Neumexiko, das speziell für diesen Zweck gebaut wurde.



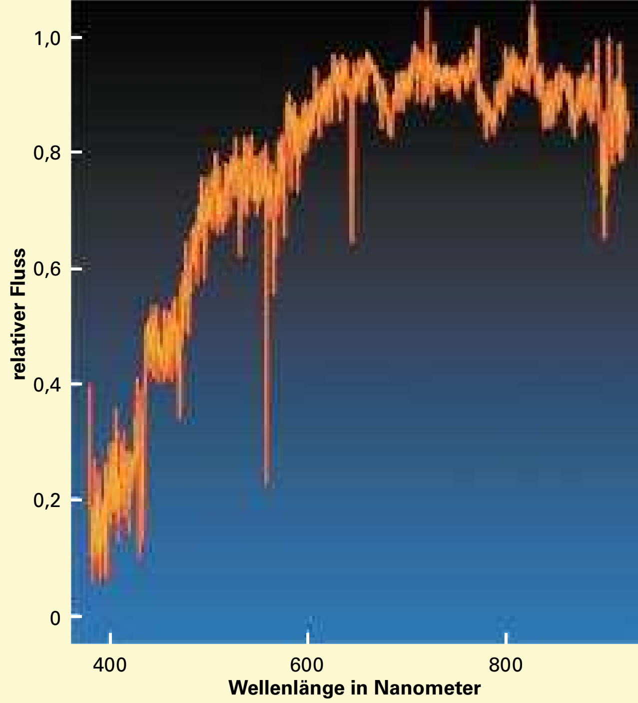
In klaren Nächten arbeitet das Teleskop im »Kamera-Modus«. Dabei fotografiert es pro Stunde 20 Quadratgrad des Himmels durch fünf Farbfilter – und liefert damit in jeder Nacht die Positionen von Millionen von Himmelskörpern.



Computerprogramme suchen in dieser Datenmenge Galaxien und andere interessante Objekte, die dann für die nachfolgende Spektroskopie ausgewählt werden. Das Bild zeigt die Spiralgalaxie UGC 03214 im Sternbild Orion.



Optische Leiter führen in eine Metallplatte mit 640 Löchern. Jede dieser Glasfasern führt das Licht eines Himmelskörpers zum Spektrografen, der in weniger klaren Nächten genutzt wird.



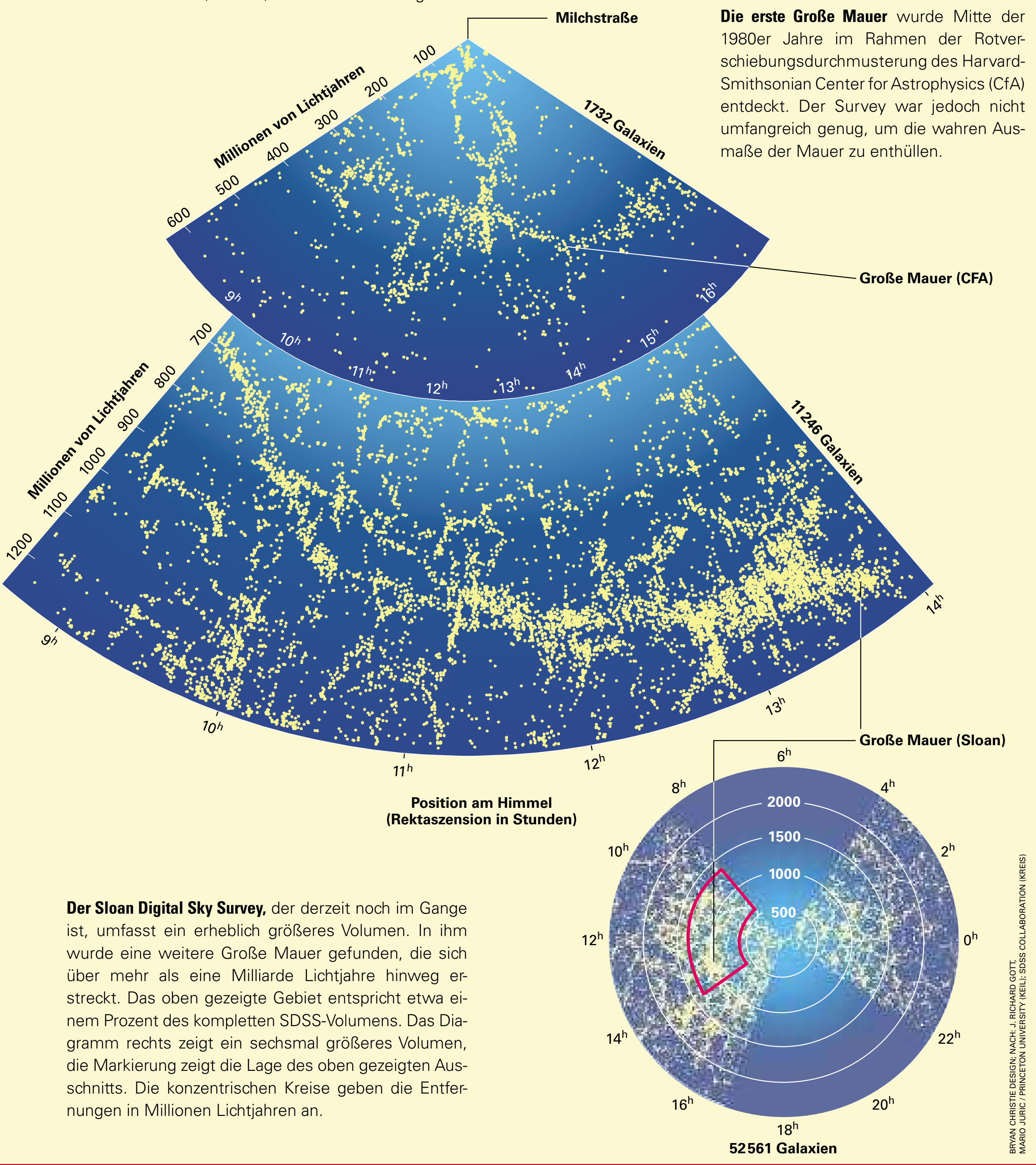
Mit Hilfe des Spektrums können die Astronomen nicht nur die Himmelskörper klassifizieren, sondern auch ihre Rotverschiebung – und damit ihre Entfernung – bestimmen.

SDSS COLLABORATION

Kosmische Karten

Die Verteilung von Galaxien (Punkte) wird in diesen keilförmigen Bildern erkennbar, die zwei verschiedene Ausschnitte des Raumes zeigen. Die dritte Dimension, die einen Winkel von mehreren Grad umfasst, ist nicht dargestellt. Die Bilder zeigen zwei auffällige »Große Mauern«, die jeweils mehrere tausend Galaxien umfassen, sowie Filamente und Leerräume (»Voids«) aller Größenordnungen.

Die erste Große Mauer wurde Mitte der 1980er Jahre im Rahmen der Rotverschiebungsdurchmusterung des Harvard-Smithsonian Center for Astrophysics (CfA) entdeckt. Der Survey war jedoch nicht umfangreich genug, um die wahren Ausmaße der Mauer zu enthüllen.



Der Sloan Digital Sky Survey, der derzeit noch im Gange ist, umfasst ein erheblich größeres Volumen. In ihm wurde eine weitere Große Mauer gefunden, die sich über mehr als eine Milliarde Lichtjahre hinweg erstreckt. Das oben gezeigte Gebiet entspricht etwa einem Prozent des kompletten SDSS-Volumens. Das Diagramm rechts zeigt ein sechsmal größeres Volumen, die Markierung zeigt die Lage des oben gezeigten Ausschnitts. Die konzentrischen Kreise geben die Entfernungen in Millionen Lichtjahren an.

einen Schlag zu gewinnen. Zu Vergleichszwecken nimmt das Gerät gleichzeitig Spektren von 32 leeren Flecken am Himmel auf. Im Gegensatz zu traditionellen Teleskopen, an denen viele Projekte abwechselnd durchgeführt und die Beobachtungszeit aufgeteilt werden muss, arbeitet das SDSS-Teleskop ausschließlich für diese Durchmusterung, Nacht für Nacht. Insgesamt sollen so die Rotverschiebungen von einer Million Galaxien und Quasaren gemessen werden. Inzwischen steht das Projekt kurz vor seiner Halbzeit. Kürzlich konnte ich mit meinen Kollegen eine erste Analyse von 200 000 Galaxien-Rotverschiebungen fertig stellen.

In einem parallel laufenden Vorhaben haben Astronomen aus Australien und Großbritannien einen speziellen Spektrografen für das 3,9 Meter große Anglo-Australian-Telescope gebaut, mit dem sich 400 Spektren gleichzeitig messen lassen. Das Instrument bildet einen Himmelsausschnitt mit einer Kantenlänge von zwei Grad ab, weshalb das Projekt auch den Namen Two-Degree-Field-Survey, kurz 2dF, trägt. Ausgangspunkt des 2dF war ein Galaxienkatalog, der aus bereits vorhandenen, sorgfältig kalibrierten und elektronisch gescannten fotografischen Himmelsatlanten gewonnen wurde. Die inzwischen abgeschlossene Durchmusterung hat innerhalb von fünf Jahren die Rotverschiebung von 221 414 Galaxien erfasst.

Was das Leistungsspektrum leistet

Unsere Surveys beschreiben die Verteilung der Galaxien. Die Dunkle Materie, die den größten Teil der Masse des Universums bildet, können wir mit ihnen nicht erfassen. Die Astronomen haben keinen Grund anzunehmen, die Verteilung der Galaxien stimme mit jener der Dunklen Materie überein. Zum Beispiel könnte es sein, dass Galaxien nur dort entstehen, wo die Dichte der Dunklen Materie einen gewissen Grenzwert überschreitet – die Astronomen nennen dies »Biasing«.

Anhand der Analyse der vorhandenen Rotverschiebungssurveys konnten meine Kollegen und ich zeigen, dass es einen engen Zusammenhang zwischen der Verteilung der Galaxien und der Dunklen Materie gibt. Wir konnten jedoch nicht zwischen einfachen Modellen mit »Biasing« und solchen ohne unterscheiden. Kürzlich hat ein Team um Licia Verde von der Universität von Pennsylvania den 2dF-Survey benutzt, um Tripletts von Galaxien zu vermessen. Es zeigte sich, dass die Anzahl solcher Trios von der Gesamtdichte inklusive der Dunklen Materie abhängt.

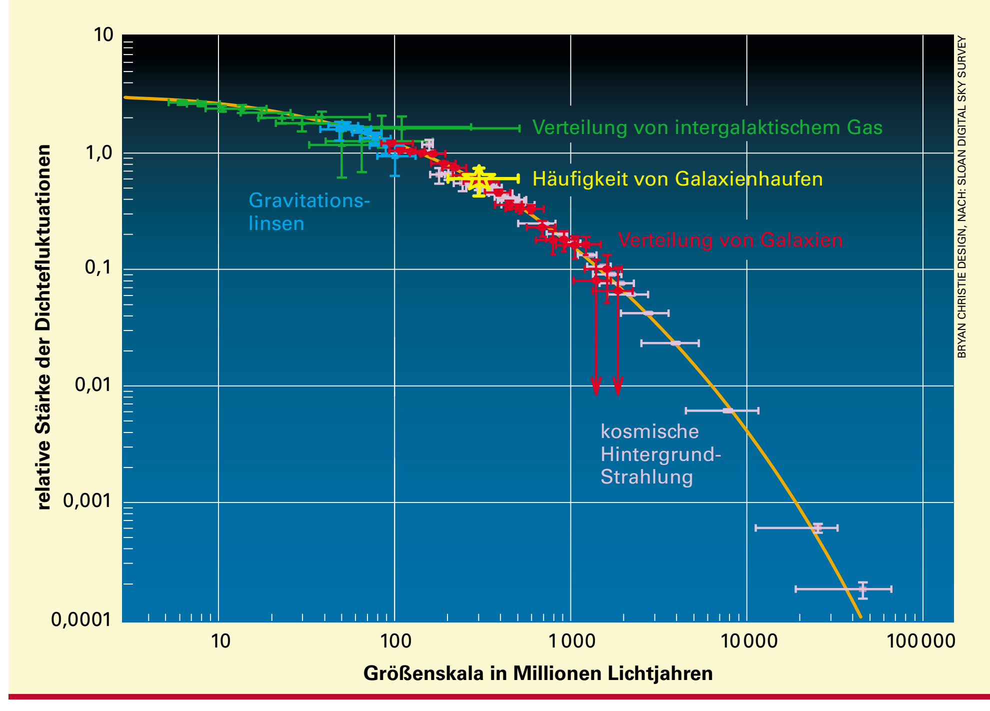
Die Forscher zogen daraus den Schluss, dass die Galaxienverteilung keinem »Biasing« unterliegt: Die Dichteverteilung der Galaxien ist direkt an jene der Dunklen Materie gekoppelt. Unsere Galaxiensurveys messen also tatsächlich die Verteilung der gesamten Materie im Kosmos.

Nach der Lösung dieses Problems konnten sich die Kosmologen an die Interpretation der Galaxienkarten machen. Eines der nützlichsten statistischen Werkzeuge zur Beschreibung der Galaxienverteilung ist das so genannte Leistungsspektrum. Stellen wir uns vor, wir verteilten eine Reihe von Kugeln mit einem Durchmesser von 40 Millionen Lichtjahren ganz zufällig im Kosmos und zählten dann die Anzahl der Galaxien innerhalb dieser Sphären. Da Sternsysteme sich in Haufen sammeln, würde ihre Anzahl von Kugel zu Kugel erheblich variieren. Diese Variation ist ein Maß für die Häufung der Galaxien, im betrachteten Fall auf der Skala von 40 Millionen Lichtjahren. Die Kosmologen führen diese Übung nun für eine Vielzahl von Kugeln mit unterschiedlichen Größen durch und messen so die Häufung der Galaxien auf allen Größenskalen.

Ein ähnliches Verfahren wendet der »Graphic Equalizer« einer Stereoanlage an, um einen komplexen Klang als Verteilung von Schallwellen unterschiedlicher Wellenlänge – oder, anders ausgedrückt, Tönen unterschiedlicher Tonhöhe – darzustellen. Der Equalizer zeigt uns, wie laut die tiefen Basstöne (mit langer Wellenlänge) oder die ganz hohen Töne (mit kurzen Wellenlängen) im Vergleich sind. Eine Person mit musikalischer Erfahrung kann bei einem Konzert

Die Verteilung der kosmischen Strukturen

Die Datenfülle der kosmischen Durchmusterungen lässt sich mit einem statistischen Verfahren auf ein so genanntes Leistungsspektrum reduzieren, das die Stärke der Dichteschwankungen (vertikale Achse) in Abhängigkeit von der untersuchten Größenskala (horizontale Achse) zeigt. Auch Daten, die mit anderen Verfahren bestimmt wurden, wie kosmische Hintergrundstrahlung, Gravitationslinsen, Galaxienhaufen-Surveys oder Wasserstoffwolken, können in ein solches Diagramm eingetragen werden. All diese Daten folgen ein und derselben Kurve (durchgezogene Linie). Die Stärke der Fluktuationen geht für wachsende Skalen gegen null, ein Beleg für die Gültigkeit des kosmologischen Prinzips von Albert Einstein. Die Pfeile geben obere Grenzwerte der Messdaten an.

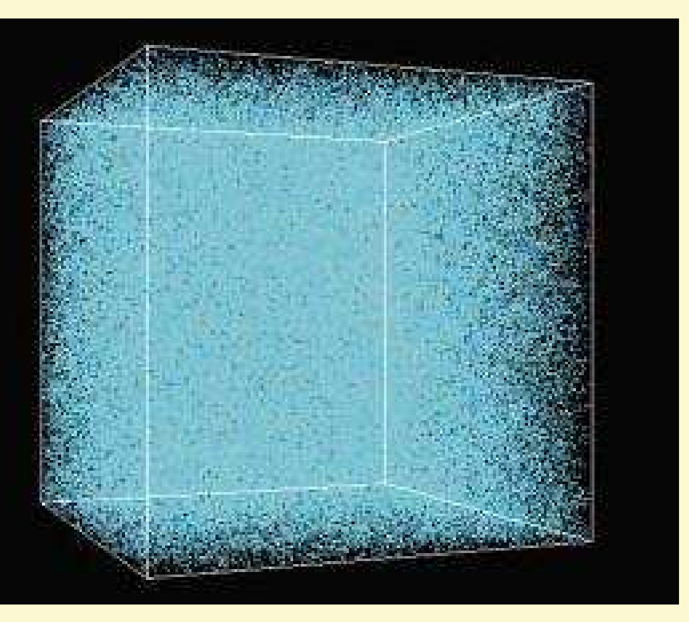


Bauplan eines Universums

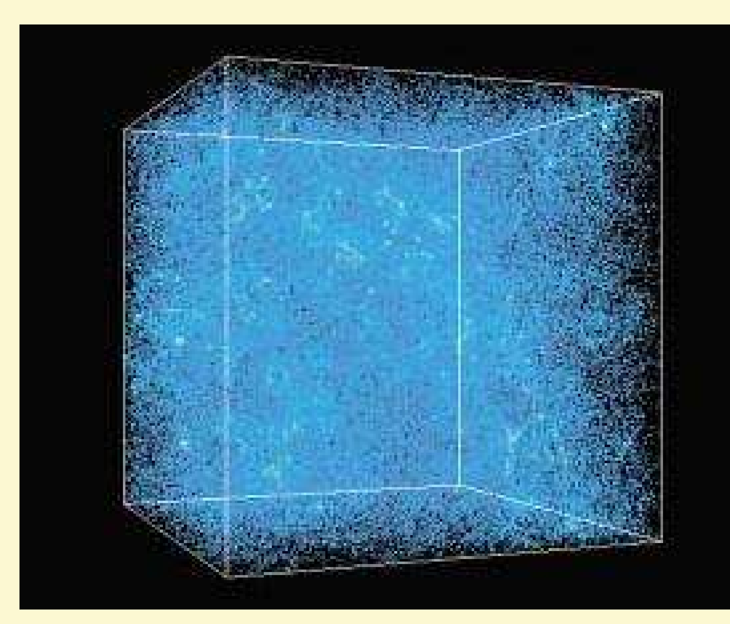
Mit Computersimulationen versuchen die Kosmologen, die heutige Materieverteilung (wie sie der Sloan Digital Sky Survey und andere Durchmusterungen ergeben) mit derjenigen im frühen Universum (repräsentiert durch die Schwankungen in der kosmischen Hintergrundstrahlung) in Zusammenhang zu bringen.

Jedes der hier gezeigten Bilder **zeigt einen Schnappschuss** der kosmischen Entwicklung zu einem bestimmten Zeitpunkt nach dem Urknall. Da das Universum expandiert, ist die Größenskala der einzelnen Bilder unterschiedlich. Die Kantenlänge des Würfels im ersten Bild beträgt etwa fünf Millionen Lichtjahre, im letzten Bild hingegen 140 Millionen Lichtjahre.

Die Punkte stellen die Materie dar. Die hier wiedergegebene Simulation wurde am National Center for Supercomputing Applications durchgeführt. Ein kompletter Film dieser Simulation ist im Internet unter http://cfcp.uchicago.edu/lss/filaments.html erhältlich.

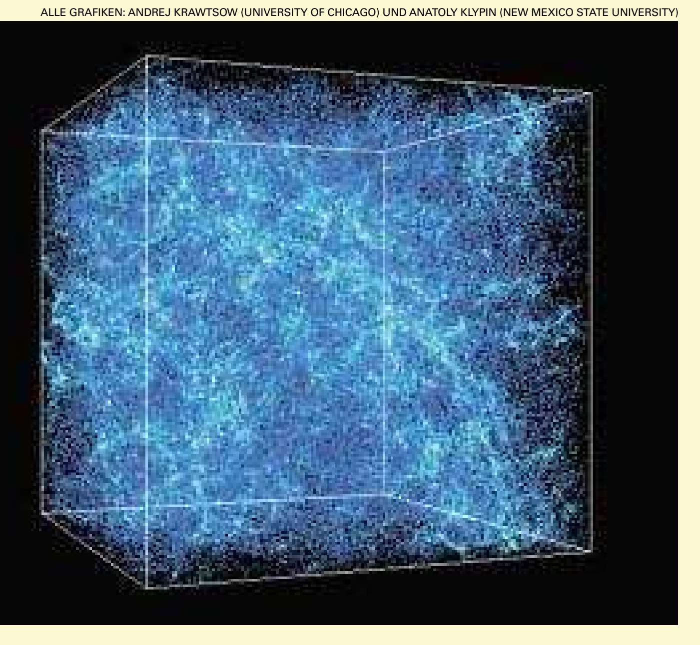


120 Millionen Jahre: Die Materie ist nahezu gleichförmig mit nur geringen Schwankungen verteilt.

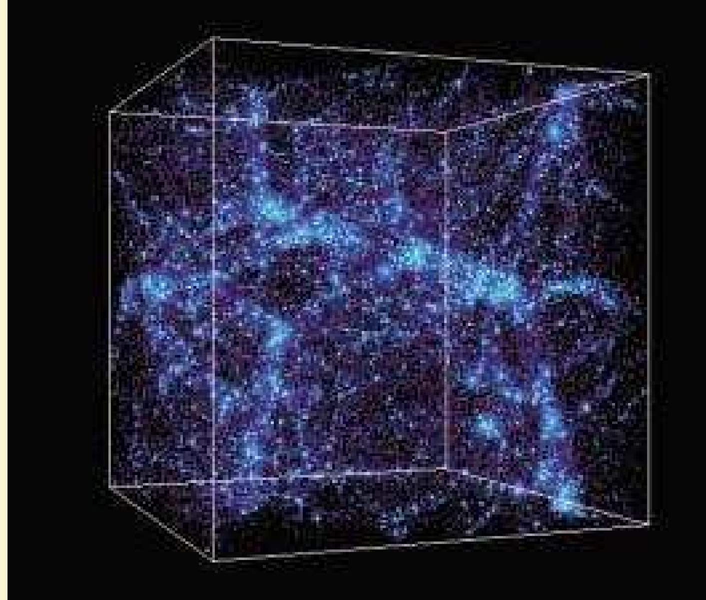


490 Millionen Jahre: Dichte Regionen ziehen auf Kosten der Regionen geringerer Dichte Materie an. Die ersten Galaxien sind entstanden.

ALLE GRAFIKEN: ANDREJ KRAWTSOW (UNIVERSITY OF CHICAGO) UND ANATOLY KLYPIN (NEW MEXICO STATE UNIVERSITY)



1,2 Milliarden Jahre: Die Schwerkraft hat die Materie in gigantischen Filamenten zusammengezogen – dazwischen liegen große Leerräume.



13,7 Milliarden Jahre (heute): Die großen Strukturen wachsen nicht mehr weiter an, da die Beschleunigung der Expansion der Schwerkraft entgegenwirkt.

▷ mit Leichtigkeit die Pikkoloflöte vom Fagott unterscheiden. Die Kosmologen versuchen nun das Gleiche mit der Verteilung der Galaxien: Sie wollen die relativen Anteile der Strukturen bei großen und kleinen Skalen bestimmen.

Die Forscher haben sowohl für den SDSS als auch für den 2dF-Survey das Leistungsspektrum ermittelt – mit übereinstimmenden Ergebnissen. Auffallend ist die Abnahme der Schwankungen zu größeren Skalen hin (siehe Grafik auf S. 65). Nur noch geringe Variationen bedeuten aber, dass die Verteilung der Galaxien nahezu homogen ist – so, wie es das kosmologische Prinzip verlangt.

Sodann erkennt man, wenn man das Leistungsspektrum im logarithmischen Maßstab aufzeichnet, dass es keine gerade Linie ergibt. Diese Abweichung bestätigt den Kosmologen: Die Dynamik des Universums hat sich mit der Zeit gewandelt. Aus anderen Beobachtungen haben die Astronomen geschlossen, dass die Energiedichte des Kosmos von der Dunklen Materie und einer weiteren mysteriösen Komponente, der so genannten Dunklen Energie, dominiert wird. Der Beitrag der Photonen, deren Energie von der Expansion des Raumes aufgezehrt wird, ist heute vernachlässigbar. Extrapoliert man jedoch in der Zeit zurück, so zeigt sich, dass die Photonen in den ersten 75 000 Jahren nach dem Urknall die dominierende Komponente der Energiedichte stellten. Zu jener Zeit der Photonenherrschaft konnte die Schwerkraft noch kein Anwachsen der Dichteschwankungen bewirken, so wie es heute der Fall ist. Dadurch verhält sich das Leistungsspektrum auf den größten Skalen – oberhalb von 1,2 Milliarden Lichtjahren – anders als auf kleineren Skalen.

Die genaue Größe dieser Abweichung liefert uns ein Maß für die Gesamtdichte der Materie im Universum. Das Ergebnis – etwa $2,5 \times 10^{-27}$ Kilogramm pro Kubikmeter – stimmt mit den aus anderen Messmethoden erhaltenen Werten überein. Die Kombination all dieser Ergebnisse schließlich deutet darauf hin, dass die Dunkle Materie »kalt« ist. Heiße Dunkle Materie nämlich hätte die Fluktuationen in der Galaxienverteilung auf kleineren Skalen verwischt – und das ist offenbar nicht der Fall.

Die Strukturen, die wir in der Galaxienverteilung sehen, sollten einfach eine verstärkte Version der Fluktuationen im frühen Universum sein. Diese frühen Fluktuationen sind direkt in der Hintergrundstrahlung sichtbar. Und erstaunlicherweise zeigt ein Vergleich der beiden Verteilungen tatsächlich eine große Übereinstimmung. Auf Skalen von annähernd einer Milliarde Lichtjahren schwankt die Galaxiendichte um etwa ein Zehntel. Die Fluktuationen der Hintergrundstrahlung betragen ein Hunderttausendstel, und das ist, extrapoliert in die Gegenwart, in schönster Übereinstimmung damit. Deshalb können wir darauf vertrauen, dass unser kosmologisches Gesamtbild – der Urknall, die gravitative Instabilität und die Evolution der kosmischen Strukturen – tatsächlich korrekt ist.

Hin zu ferneren Galaxien

Der SDSS untersucht die Struktur des Kosmos auf Skalen von 100 Millionen bis zu über einer Milliarde Lichtjahren. Um noch größere Skalen zu untersuchen, wurde die Durchmusterung um eine Sammlung extrem leuchtkräftiger Galaxien in Entfernungen von bis zu fünf Milliarden Lichtjahren ergänzt. Zur Überprüfung kleinerer Skalen schließlich dient eine andere Ergänzung des SDSS: die Untersuchung der Absorptionslinien weit entfernter Quasare, die durch ein dichtes Netzwerk von Wasserstoffwolken verursacht werden, aus denen noch keine Galaxien entstanden sind.

Mit Hilfe dieser Daten hoffen die Kosmologen, weitere Zusammenhänge zwischen den heute sichtbaren kosmischen Strukturen und der kosmischen Hintergrundstrahlung, die die Strukturen des frühen Kosmos widerspiegelt, aufzudecken. So zeigt das Leistungsspektrum der Hintergrundstrahlung beispielsweise eine Reihe deutlich unterscheidbarer Maxima, aus denen sich der relative Anteil von Dunkler und normaler Materie ablesen lässt. Die Forscher hoffen nun, die entsprechenden Maxima auch im heutigen Leistungsspektrum der Galaxienverteilung zu finden. Wenn das gelänge, so wäre es ein weiterer Hinweis darauf, dass die heute sichtbaren Strukturen direkt aus den Fluktuationen im jungen Kosmos entstanden sind.

Die zeitliche Entwicklung der Strukturen lässt sich auch verfolgen, indem man zu immer ferneren Galaxien übergeht – denn der Blick in größere Entfernungen ist zugleich ein Blick in die tiefere Vergangenheit. Die Dunkle Materie sollte sich in früheren Zeiten noch nicht so stark zusammenballen, da der Prozess der gravitativen Instabilität noch nicht genügend zur Wirkung kommen konnte. Mit dem Very Large Telescope der Europäischen Südsternwarte Eso und den Keck-Teleskopen auf Hawaii durchgeführte Durchmusterungen zeigen jedoch, dass extrem weit entfernte Galaxien schon ebensolche Haufen bilden und dass sie ebenso in filamentartigen, blasenförmigen Strukturen angeordnet sind wie in unserer näheren Umgebung. Das ist seltsam: Im Gegensatz zu den heutigen Galaxien, deren Verteilung jener der Dunklen Materie folgt, müssen die damaligen Galaxien sich demnach stärker zusammenballen als die dahinter verborgene Dunkle Materie. Dieses Phänomen gibt uns vermutlich einen wichtigen Hinweis auf die Prozesse der Galaxienentstehung.

Die Wissenschaftler sind heute nahe daran, die Entwicklung der Strukturen im Kosmos vollständig zu verstehen – von den ersten kleinen Schwankungen im heißen Plasma unmittelbar nach dem Urknall bis hin zu den hellen Galaxienhaufen im heutigen Universum. Der weitere Weg ihrer Forschungen ist vorgezeichnet. Welcher Mechanismus führte zu den ersten Fluktuationen in der Hintergrundstrahlung? Wie genau sind die Galaxien entstanden? Warum haben sie gerade die Eigenschaften, die wir heute sehen? Und hätte es auch anders kommen können – wäre also ein Universum denkbar, das anfänglich deutlich stärkere oder deutlich schwächere Fluktuationen aufwies? Das sind die großen Fragen, die vielleicht einen Schüler oder Studenten, der diesen Artikel liest, dazu inspirieren, sich der Kosmologie zu verschreiben. ◁

AUTOR UND LITERATURHINWEISE

Michael A. Strauss ist stellvertretender Projektwissenschaftler und Sprecher des Sloan Digital Sky Surveys, eines Projekts, mit dem ein Viertel des Nachthimmels umfassend kartiert wird. Nach seiner Promotion in Physik an der Universität von Kalifornien in Berkeley arbeitete Strauss als Postdoc am California Institute of Technology in Pasadena und am Institute for Advanced Studies in Princeton (New Jersey). Er ist jetzt Mitglied der Fakultät für Physik der Universität Princeton.

Kosmologie für die Westentasche. Von Rudolf Kippenhahn. Piper, 2003

Kosmologie. Von Gerhard Börner. Fischer, Frankfurt 2002

Weblinks zu diesem Thema finden Sie bei www.spektrum.de unter »Inhaltsverzeichnis«.



Atombatterie

Die schnellen Elektronen, die ein Strontium-Präparat aussendet, teilen die Materie beim Durchgang in Ionen und Sekundärelektronen … Ein einziges schnelles Elektron kann mehrere hunderttausend Sekundärelektronen erzeugen … eine solche Anordnung wirkt dann als Batterie … Sie liefert einen Strom von fünf Mikroampere und 0,2 Volt Spannung … Die Batterie ist winzig klein und leicht. Sie nimmt in ihrer Leistung innerhalb eines Monats um weniger als ein Prozent ab. Und es gibt manche Aufgabe, bei der es auf geringe Raumerfüllung, kleines Gewicht oder lange Lebensdauer ankommt … man denke etwa an eine elektrische Armbanduhr. Auch Geräte für Schwerhörige lassen sich auf diese Weise elektrisch speisen. *(Orion, 9. Jg., Nr. 11/12, 1954, S. 463)*



◀ State of the art: Das Morsegerät kann nun auch mit einer Atombatterie betrieben werden.

Achselgeruch

Der typische Geruch der menschlichen Achselhöhle wurde auf das Vorhandensein von apokrinem Schweiß zurückgeführt … Er nimmt erst mit der Zeit einen zunehmend faulen Geruch an. Der typische scharfe Achselgeruch, welcher sich normalerweise innerhalb weniger Stunden einstellt, wird durch bakteriell bedingte Zersetzungserscheinungen hervorgerufen … Präparate mit Aluminiumsalzen entfalten eine merkliche desodorierende Wirkung auf Grund eines antibakteriellen Effektes und einer chemischen Beeinflussung der Geruchsstoffe. Bei täglicher Verwendung können sie bei vielen Personen den Achselgeruch für 12–18 Stunden unterdrücken. *(Die Umschau, 54. Jg., Heft 11, 1954, S. 344)*

Jet Stream

Diese Bezeichnung wurde in Amerika für eine außerordentlich schnelle Luftströmung eingeführt, welche während des Krieges den Besatzungen der Langstreckenbomber … auffiel. Die seit 1946 systematisch durchgeführte Forschung führte zu der Feststellung, daß es sich um eine dauernd vorhandene, ausgeprägte Luftbewegung handelt in einem Gürtel, der etwa vom 25. und 45. nördlichen Breitengrad begrenzt wird … In erster Linie dürfte sie darauf zurückzuführen sein, daß in jener Zone beim Zusammentreffen polarer und tropischer Luftmassen … ein hohes Druckgefälle vorliegt. *(Naturwissenschaftliche Rundschau, 7. Jg., Heft 6, 1954, S. 255)*

Bakterienlicht

Professor Hans Molisch hat eine Bakterienlampe konstruiert, welche … 2 bis 3 Wochen lang mit so hellem Lichte leuchtet, daß es nicht nur möglich ist, im Dunkeln die Taschenuhr, das Thermometer und auf 1 bis 2 Meter das Gesicht einer Person zu erkennen, sondern auch photographische Aufnahmen zu erhalten. Molisch hat seiner der Wiener Akademie der Wissenschaften vorgelegten Abhandlung die Photogramme einer Schillerbüste, eines Thermometers und eines Buchdruckes beigegeben, bei deren Herstellung ausschließlich das Bakterienlicht als Lichtquelle gedient hatte. Wegen … der großen Billigkeit glaubt Molisch, daß der Bakterienlampe eine Zukunft beschieden ist. *(Der Stein der Weisen, Bd. 31, 1904, S. 252)*

Menschen- und Rindertuberkulose

Als Professor Koch seinerzeit mit seiner bekannten Theorie hervortrat, daß die Tuberkulose, die bei dem Rindvieh vorkommt, nicht ohne weiteres auf Menschen übertragbar sei … stieß er damit auf großen Unglauben, und es wurde sofort eine Kommission ernannt … Die hervorragenden Aerzte … haben … nachgewiesen, daß die Krankheit durchaus dieselbe ist, und daß sie sich infolgedessen leicht von Mensch auf Tier und umgekehrt übertragen lassen muß … es könne keinem Zweifel unterliegen, daß z. B. durch die Milch von einer mit Tuberkeln behafteten Kuh die Krankheit übertragen werden könne. *(Beilage zur Allgemeinen Zeitung, Jg. 1904, Nr. 125, 1904, S. 399)*

Freihand-Stativ »Pendil«



Selbst der geübteste Amateur vermag nicht immer das »Verwackeln« der Aufnahme zu vermeiden … Um diesen Übelstand zu steuern, hat die »Optische Industrieanstalt« ein Freihandstativ konstruiert. Das »Pendil« besteht aus einer Traghülse T mit verschiebbarem Schaft S … am unteren Ende der Traghülse sind zwei umklappbare Metallbügel befestigt, die ein sicheres Stützen des Stativs gegen den Körper gewährleisten; mittels des ledernen Tragriemens lässt sich die Höhe … leicht regulieren. *(Die Umschau, 8. Jg., Nr. 26, 1904, S. 517)*



▲ Bauchstütze für scharfe Bilder



Die ersten Nanochips ...

... sind längst auf dem Markt. Die aktuelle Generation von Prozessoren hat bereits die Schwelle in die Nanodimension überschritten.

Von G. Dan Hutcheson

Die Nanotechnologie wird nicht nur unsere Zukunft prägen, sie hat bereits klammheimlich Einzug in die Gegenwart genommen. Der Prozessor eines handelsüblichen Pentium 4 versammelt auf wenigen Quadratzentimetern Größe etwa 42 Millionen Transistoren, die feinsten ihrer Strukturen sind gerade mal 130 Nanometer (milliardstel Meter) breit. Derzeit kommt eine neue Generation auf den Markt, die diese Marke auf 90 Nanometer unterbietet. Der Rekord liegt bei 50 Nanometer Strukturbreite, das entspricht etwa einem Tausendstel der Dicke eines Menschenhaares.

Die Vorteile liegen auf der Hand: Je kleiner die Bauteile, desto mehr davon lassen sich auf engem Raum zusammenpacken, desto weniger Strom verbrauchen die geschrumpften Leitungswege und umso schneller können zum Beispiel Transistoren schalten (in Computerchips ist dies ihre Hauptaufgabe: die kurzzeitige Repräsentation der Zahlen Null beziehungsweise Eins). Zudem sinken die Kosten pro Transistor, auch das ist ein großer Anreiz.



Um den Status quo zu erreichen, mussten sich die Industrieforscher allerhand einfallen lassen. Schon das Ausgangsmaterial jedes Chips erforderte neue Verfahren, um »nanotauglich« zu werden. Die Schaltkreise werden in großer Zahl aus so genannten Wafern produziert. Das sind dünne Siliziumscheiben. Bislang schnitt man sie aus einem großen Einkristall, der aus einem Keim in einer Siliziumschmelze heranwuchs. Doch unvermeidbare Verschiebungen im atomaren Gitter behindern auf der Nanoskala zum Beispiel die Elektronenpassage. Die Lösung ist eine Kristallschicht auf dem Wafer, die sich aus einem siliziumhaltigen Gas ohne solche Gitterdefekte abscheiden lässt. Andere Tricks wie das *Silicon-on-insulator*-Verfahren und eine mechanische Vorspannung des Siliziumkristalls haben die Schaltgeschwindigkeit der Transistoren ebenfalls drastisch erhöht (siehe dazu Kasten S. 74).

Auch deren Fertigung wurde in den letzten Jahren dramatisch weiterentwickelt. Das betrifft schon einen der ersten Schritte: das Herstellen einer dünnen Lage Siliziumdioxid, um verschiedene Teile eines Transistors gegeneinander elektrisch zu isolieren. Dazu setzt man den Wafer herkömmlich Wasserdampf aus, wobei das Silizium oxidiert. Anders

als Rost an Metall löst sich diese Schicht nicht von der Oberfläche ab und bildet nun eine Barriere, durch die weiterer Sauerstoff diffundieren muss, um frisches Silizium zu erreichen. Je kürzer diese Diffusion dauert, desto dünner die resultierende Oxidschicht.

Doch dabei entstehen neue Probleme. Ein zentraler Bestandteil so genannter Feldeffekt-Transistoren ist die Gatterelektrode, die durch eben eine solche Lage Siliziumoxid vom Substrat elektrisch isoliert werden muss. Aufgabe dieser Elektrode ist die Injektion von Ladungsträgern in einen Leitungskanal. Wird das Gatteroxid sehr dünn, ist es nicht mehr robust genug, macht man es wieder dicker, sinkt dessen Kapazität, und die ist erforderlich, um eine hohe Zahl von Ladungsträgern einzuspeisen.

Die Lösung ist ein Materialwechsel: Die Hersteller ersetzen Siliziumdioxid durch so genannte Hoch-K-Materialien wie Hafniumoxid oder Strontiumtitanat. Sie erlauben dickere und damit robustere Oxidschichten, ohne die Aufgaben des Gatters zu beeinträchtigen. Die Platzierung eines Hoch-K-Materials ist aber ausgesprochen anspruchsvoll. Am besten erreicht man das durch eine Beschichtungstechnik namens *atomic-layer deposition*, also eine Abscheidung einzelner Atomlagen. Um zum Beispiel eine Schicht des Hoch-K-Gatterisolators Zirkondioxid aufzubauen, setzt man die Siliziumoberfläche zunächst einem Gas aus Zirkoniumtetrachlorid ($ZrCl_4$) aus. Einzelne Moleküle haften an der Fläche, verbinden sich aber nicht miteinander. Als zweites Gas schlägt sich Wasserdampf (H_2O) nieder. Beide Molekülarten reagieren miteinander und bilden einen nur ein Molekül dicken Film aus dem gewünschten Dioxid (ZrO_2). Dieser Prozess wird so lange wiederholt, bis der Film die erforderliche Dicke hat.

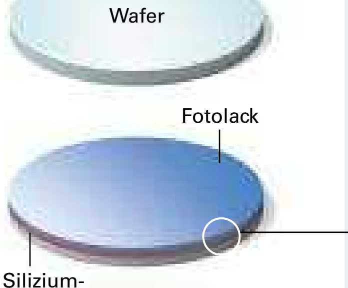
Wie auch immer erzeugt, muss die Isolatorschicht anschließend strukturiert werden. Das Standardverfahren dafür ist die Lithografie: Die gewünschten Muster werden über eine Maske auf den Isolator abgebildet, genauer gesagt auf eine Lage Fotolack. Die belichteten Partien lassen sich anschließend leicht entfernen, während unbelichtete durch Erwärmung und chemische Behandlung fixiert werden. Wo die Isolationsschicht ▷

▼ **Gatterelektroden (gelb) sind die kleinsten derzeit herstellbaren Strukturen von Feldeffekt-Transistoren; mit einer Breite um 100 Nanometer machen sie die Prozessoren moderner Pentium-Rechner zu Nanochips (hellblau: Silizium des Transistors; dunkelblau: Siliziumsubstrat; grün: Isolator; grau und weiß: elektrische Leitungen und Kontakte).**

State-of-the-art in der Halbleiterfabrikation

Ein kreisrunder Wafer von der Größe eines Speisetellers bildet den Ausgangspunkt der Chipproduktion. Einige der dargestellten Prozesse werden viele Male wiederholt, um komplexe Strukturen schichtweise zu erzeugen.

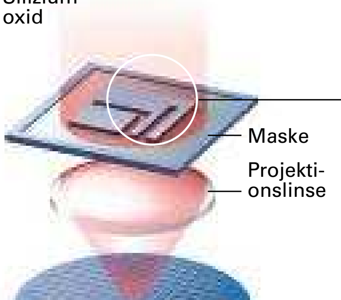
Grundlegender Prozess



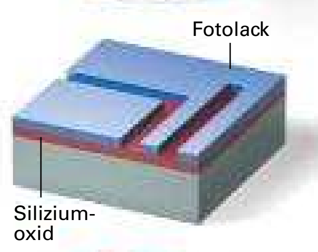
0 Silizium-Einkristall (Wafer)

1 Dampf oxidiert die Siliziumoberfläche (rote Lage).

2 Fotolack bedeckt den Wafer.



3 Lithografie überträgt das gewünschte Muster auf den Wafer.



4 Chemikalien und hohe Temperatur härten den belichteten Fotolack, unbelichtete Bereiche werden entfernt.

5 Chemikalien ätzen das Oxid selektiv nur dort, wo kein Fotolack es schützt.

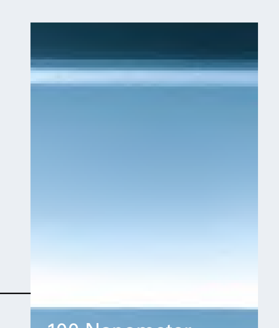
6 Ionen-Beschuss erzeugt Quelle *(source)* und Senke *(drain)*.

Verbindungs-
stellen

7 In einer späten Phase der Herstellung werden Metallkontakte mittels Lithografie hinzugefügt.

Metallkontakt

Verbesserungen in der Chipherstellung



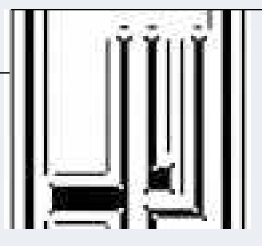
gespanntes Silizium

Silizium-Germanium-Mischung

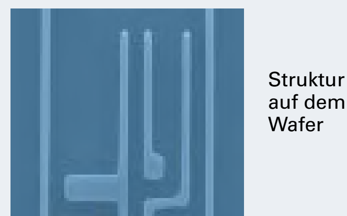
Oxid

Substrat

Oxidschichten und eine Verspannung des Siliziums durch das Kristallgitter eines anderen Materials verbessern die Transistorleistung.



Muster auf der Maske



Struktur auf dem Wafer

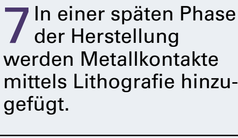
Moderne Techniken wie die optische Abstandskorrektur *(optical proximity correction)* gleichen Beugungseffekte aus. Das ermöglicht, Strukturen der Belichtungsmaske abzubilden, die kleiner sind als die Wellenlänge des bei der Projektion verwendeten Lichts.





Superkritisches Kohlendioxid dringt in winzige Öffnungen ein und entfernt Fotolack, Chemikalien und Partikel, ohne Schäden anzurichten.

Aus urheberrechtlichen Gründen können wir Ihnen die Bilder leider nicht online zeigen.



Siliziumsubstrat

3000 Nanometer

Bis zu acht Leitungsebenen verbinden die Millionen von Transistoren eines typischen Mikroprozessors. Aluminium, das lange für diesen Zweck verwendet wurde, ist nun durch Kupfer ersetzt worden. Das ist zwar schwieriger aufzubringen, erhöht aber Geschwindigkeit und Stabilität des Signals in den Leitungen.

GRAFIKEN: BRYAN CHRISTIE DESIGN; FOTOS RECHTS OBEN: GIANNI TARASCHI / MIT; MITTE OBEN: MIT FREUNDL. GENEHMIGUNG VON ASML MASKTOOLS; MITTE UNTEN: MIT FREUNDL. GENEHMIGUNG VON SC FLUIDS INC.; RECHTS UNTEN: MIT FREUNDL. GENEHMIGUNG VON IBM VERMONT

▷ ungeschützt zu Tage tritt, können geeignete Chemikalien sie nun angreifen und wegätzen.

Es ist erst wenige Jahre her, da galt es als ausgemacht, dass die Wellenlänge des angewandten Lichtes der Lithografie eine Grenze setzt. Denn bei kleineren Strukturen der Maske verzerrt Beugung die Kanten und Ecken. Dennoch wurden mittlerweile Strukturgrößen von 70 Nanometern erreicht, obwohl das verwendete ultraviolette Licht eine Wellenlänge von 248 Nanometern hat. Dieses kleine Wunder bewirken Techniken und Apparaturen mit kompliziert klingenden Namen wie optische Abstandskorrektur *(optical proximity correction)* und Phasenmaske *(phase-shifting mask)*. Die Idee dahinter ist aber im Prinzip recht einfach: Da sich die Beugungsverzerrungen gut berechnen lassen, werden sie schlicht im Vorhinein schon berücksichtigt. Soll beispielsweise eine exakt rechteckige Fläche belichtet werden, vergrößert die Abstandskorrektur die Ecken der entsprechenden Öffnung im Maskenmuster – das Ergebnis ähnelt einem Hundeknochen – und durch Beugung entsteht auf dem Wafer ein Rechteck. Bei der Phasenlithografie erhält die Maske zusätzliche Linien, deren Beugungsmuster mit denen der erwünschten Strukturen interferieren – die resultierenden Konturen sind dann wieder deutlicher.

Spiegel ersetzen die Linsensysteme

Doch leider haben diese Verfahren nun tatsächlich ihre Grenzen erreicht: Strukturgrößen von 50 Nanometern lassen sich mit Licht von 193 Nanometer Wellenlänge noch erreichen, mehr geht nicht. Die viel versprechendste Lösung ist eine Lithografie mit Licht sehr viel kürzerer Wellenlänge – Astronomen würden von weicher Röntgenstrahlung reden, der bevorzugte Sprachgebrauch in der Halbleiterindustrie ist »extremes Ultraviolett«. Prototypen solcher Belichtungsmaschinen (Stepper) erreichen 13 Nanometer Auflösung.

Es sind echte Wunder der Technik, sowohl auf Makro- als auch auf Nanoskalen. Da alle Materialien Wellenlängen im extremen Ultraviolett stark absorbieren, wären Linsensysteme, die das Licht in bisherigen Steppern bündeln, praktisch undurchsichtig. Ausgeklügelte Spiegelsysteme übernehmen ihre Aufgabe. Aus dem gleichen Grunde eignen sich auch die Glasmasken der konventionellen Lithografie nicht für die Abbildung komplexer Strukturen mit extremer UV-Strahlung. Statt lichtdurchlässig zu sein, müssen die neuartigen Masken es in hohem Maße reflektieren; dazu werden Dutzende von Lagen Molybdän und Silizium aufeinander geschichtet, jede nur einige wenige Nanometer dick. Die abzubildende Struktur wird auf dieser Maske als Strahlung absorbierende Chromschicht aufgebracht.

Doch nun fangen die Probleme erst richtig an. Natürlich müssen diese Masken frei von Defekten sein, doch herkömmliche optische Untersuchungsmethoden sind bei diesen Wellenlängen ebenfalls nicht einsetzbar. Wissenschaftler und Ingenieure in den USA und Europa suchen nach Lösungen für dieses und andere technische Probleme. So lange müssen die Chiphersteller die Grenzen der konventionellen Lithografie und Strukturgrößen um die 50 Nanometer noch akzeptieren.

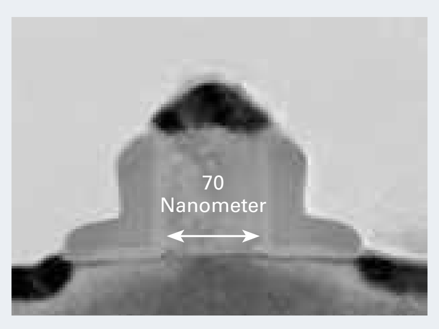
Steht die EUV-Lithografie endlich zur Verfügung, um noch feinere Strukturen in Fotolack zu prägen, stellt sich die Frage, wie belichtete Bereiche selektiv entfernt werden können. Selbst das Wegspülen von gelöstem Lack und Chemikalien wird mit den schrumpfenden Dimensionen ziemlich kompliziert. Denn auf der Nanometerskala werden die winzigen Strukturen zu hauchdünnen Wolkenkratzern, die durch schmale Schluchten getrennt sind. Konventionelle Reinigungsflüssigkeiten würden wie zähflüssige Wellen hindurchschwappen, könnten Strukturen umkippen oder einfach in den Nano-Canyons stecken bleiben.

Superkritisch, aber hocherwünscht

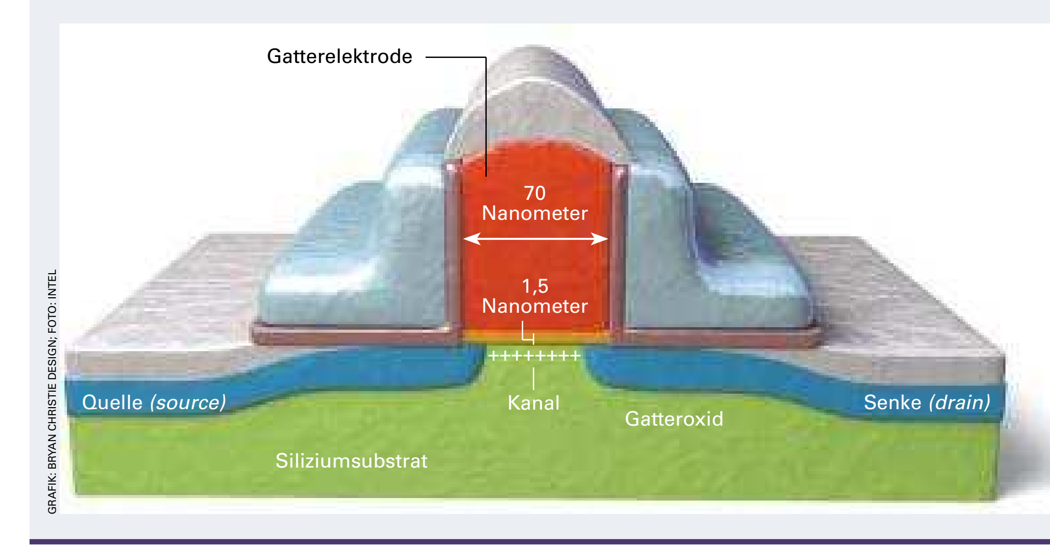
Eine geniale Alternative deutete sich in den 1990er Jahren in den Arbeiten des Los Alamos National Laboratory an: superkritische Flüssigkeiten. Kohlendioxid verhält sich oberhalb eines kritischen ▷

Der Feldeffekt-Transistor

Ein grundlegendes Bauteil auf jedem Mikroprozessorchip ist der Feldeffekt-Transistor, der vereinfacht gesagt vor allem als Schalter arbeitet. Die richtige Spannung an der Gatterelektrode induziert Ladung entlang eines Kanals, durch den somit Strom von der Quelle *(source)* zur Senke *(drain)* fließt – der Transistor schaltet ein. Mit hinreichend kleinen Gattern können derartige Bauelemente milliardenmal pro Sekunde schalten.



Die erste Generation der Nanometer-Transistoren (hier: von Intel)



GRAFIK: BRYAN CHRISTIE DESIGN; FOTO: INTEL

▷ Wertes von Druck und Temperatur wie eine Flüssigkeit, besitzt aber wie ein Gas nach wie vor keine Viskosität. Superkritisches Kohlendioxid fließt daher leicht unter störende Partikel und spült sie mechanisch viel besser hinweg als konventionelle Mittel. Und im Verein mit bestimmten Chemikalien löst es auch Fotolack. Dabei verhindert die fehlende Viskosität, dass die feinen Strukturen Schaden nehmen. Sind alle Kontaminationen entfernt, wird der Druck gesenkt und aus der Reinigungsflüssigkeit wird wieder ein Gas, das sich verflüchtigt.

Der auf diese Weise gewaschene und getrocknete Wafer ist nun fertig für den nächsten Schritt: das Anbringen der elektrischen Kontakte des Transistors. Diese beiden Elektroden befinden sich auf beiden Seiten des Gatters und dienen der Einspeisung *(source)* bezie-

Silizium schneiden und verspannen

Schneller schalten

Oxidschichten und mechanische Spannung im Siliziumgitter erhöhen die Schaltgeschwindigkeit von Transistoren.

Transistoren und andere elektronische Bauelemente werden herkömmlich durch Manipulation der Oberfläche eines Silizium-Wafers gefertigt. Zwangsläufig aber entsteht dabei zwischen diesen Strukturen und dem Wafer (der überwiegend lediglich als Trägermaterial, als Substrat dient) eine Kapazität, die Ladungsträger speichert. Das verringert aber die Schaltgeschwindigkeit und erhöht den Energiebedarf des Chips. Eine Lösung ist eine dünne Lage isolierenden Oxids. Die Einführung einer solchen *Silicon-on-insulator*-Geometrie kann die Schaltrate der Transistoren um bis zu 30 Prozent verbessern, das ist etwa der Zugewinn eines Generationswechsels in der Bauteilgröße.

IBM hat diese Technik entwickelt und vertreibt seit fünf Jahren seine SIMOX-Schaltkreise. Diese Abkürzung steht für *separation by implantation of oxygen* (Trennung durch Einbringen von Sauerstoff). Silizium wird bei diesem Prozess mit Sauerstoff-Ionen bombardiert. Von elektrischen Feldern beschleunigt gelangen diese geladenen Teilchen tief in den Wafer, wo sie mit dem Silizium reagieren und die gewünschte isolierende Oxidschicht bilden. Allerdings richten sie auf ihrem Weg auch allerlei Unheil an, sodass Erwärmung durch den Beschuss entstandene Risse im Kristallgitter ausheilen muss. Problematischer aber ist, dass diese Sauerstoff-Implantation relativ lange dauert und somit die Kosten hochtreibt. Deshalb reserviert IBM diese Technik für hochpreisige Chips.

Doch es geht auch anders: Scheidet man eine isolierende Oxidschicht direkt auf dem Silizium ab und verbindet das Ergebnis mit einem zweiten, unbehandelten Wafer, muss »lediglich« überschüssiges Material auf einer Seite entfernt werden. Die französische Firma Soitec entwickelte dazu die notwendige Präzisionsschneidemethode »Smart-Cut«. Wieder werden Ionen beschleunigt. Sie dringen durch die Oxidschicht des ersten Wafers in die unterliegende Siliziumschicht. Doch diesmal kommt Wasserstoff zum Einsatz. Der kann viel schneller eingebracht werden als Sauerstoff, was Prozesskosten reduziert. Zudem richten Wasserstoff-Ionen dort, wo sie stoppen, den größten Schaden an. Es entsteht eine Sollbruchebene im Silizium, entlang derer der unerwünschte Teil des Wafers abzuspalten ist; Unebenheiten der entstandenen Oberfläche lassen sich problemlos glatt polieren. Auch IBM verwendet Smart-Cut bereits für seine schnellsten Chips und der Konkurrent AMD wird das Verfahren für seine nächste Generation von Mikroprozessoren einsetzen.

Um die Schaltgeschwindigkeit von Transistoren zu erhöhen, eignet sich zudem eine Vorspannung des Siliziums *(strained silicon)*. Streckung des Siliziumgitters um etwa ein Prozent verbessert nämlich die Beweglichkeit der Elektronen im Gitter. Diese Spannung entsteht, wenn Silizium an ein anderes kristallines Material mit größeren Gitterabständen gebunden wird, in diesem Fall eine Silizium-Germanium-Mischung. Obwohl die technischen Details sorgfältig unter Verschluss gehalten werden, ist bekannt, dass viele Hersteller diese Technik übernehmen. Intel verwendet beispielsweise *strained silicon* in einer fortgeschrittenen Version des Pentium 4, genannt Prescott, dessen Verkauf Ende letzten Jahres anlief.

Wafer A

1 Hitze und Dampf oxidieren die Oberfläche von Wafer A (rot).

Wafer B

Wasserstoff-Ionen

2 Wasserstoff-Ionen dringen in den Kristall ein und schwächen eine Schicht unterhalb des Oxids. Der Wafer wird danach gewendet.

3 Nach dem Reinigen werden A und B verbunden.

4 Der resultierende Wafer wird entlang der geschwächten Kristallschicht gespalten.

Wafer mit Oxidschicht

5 Erhitzen und Polieren beenden den Prozess.

BRYAN CHRISTIE DESIGN

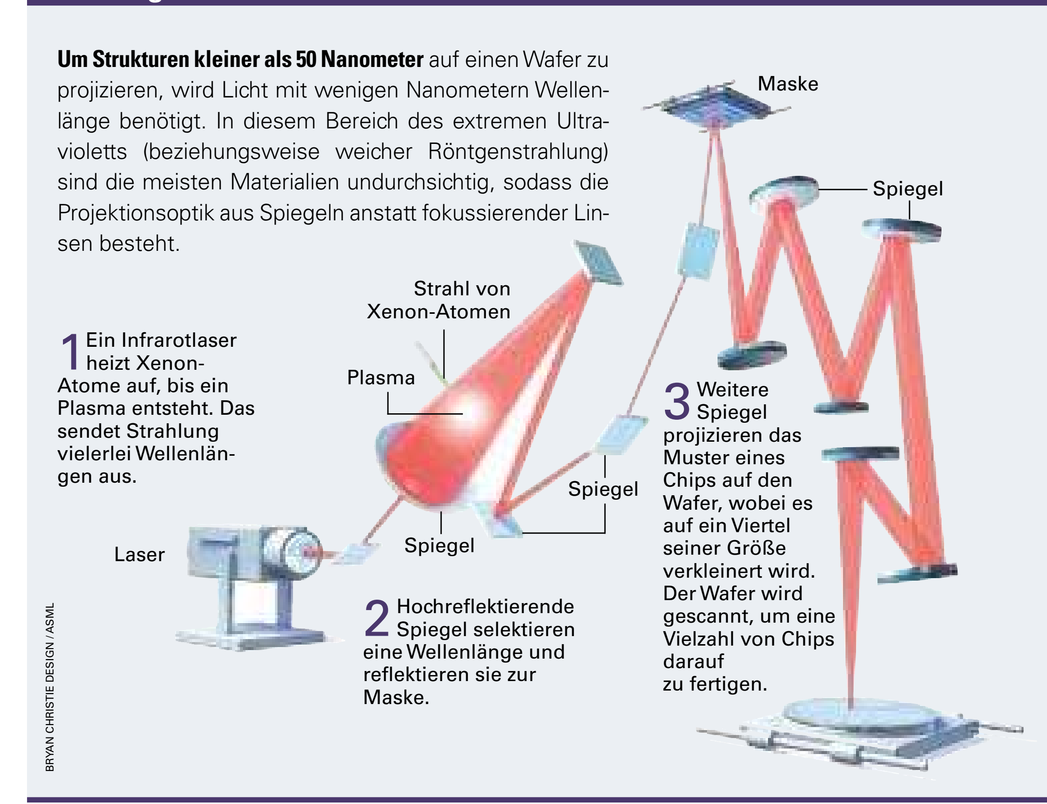
◀ **Die *Silicon-on-insulator*-Technik ist dank des Smart-Cut-Verfahrens der französischen Firma Soitec billiger und flexibler geworden.**

hungsweise dem Abfluss *(drain)* des Stroms. Zu diesem Zweck versetzt man den Halbleiter mit anderen Stoffen und wandelt ihn so in einen Leiter um. Üblicherweise wird das Silizium dazu mit Arsen- oder Bor-Ionen beschossen. Durch Erhitzen erhalten diese genug Energie, um sich in den Kristallgitterverbund einzugliedern, doch unglücklicherweise wandern einige dabei auch tiefer in den Kristall als erwünscht.

Die Temperatur muss deshalb so schnell steigen, dass sich nur eine sehr dünne Schicht an der Oberfläche aufheizt, denn die kühlt ohne weitere Maßnahmen schnell wieder ab. Heutige Systeme erreichen tausende Grad pro Sekunde. Dennoch diffundieren Bor und Arsen tiefer als erwünscht und machen die Kontakte dadurch dicker als benötigt. Ein Heilmittel dagegen halten Entwicklungslabore bereit: Bei der thermischen Laserbearbeitung wird jeweils nur ein winziger Fleck erhitzt, was Temperaturraten bis zu fünf Milliarden Grad pro Sekunde ermöglicht. Diese Technik, die bald in die Praxis gehen soll, verhindert die Diffusion praktisch vollständig und liefert deshalb extrem schmale Anschlusskontakte.

Lithografie mit extremem UV-Licht

Um Strukturen kleiner als 50 Nanometer auf einen Wafer zu projizieren, wird Licht mit wenigen Nanometern Wellenlänge benötigt. In diesem Bereich des extremen Ultravioletts (beziehungsweise weicher Röntgenstrahlung) sind die meisten Materialien undurchsichtig, sodass die Projektionsoptik aus Spiegeln anstatt fokussierender Linsen besteht.



Alte Techniken für modernste Chips

Transistoren allein machen noch keine integrierten Schaltungen. So werden zum Beispiel für Speicherbausteine vom Typ DRAM *(dynamic random-access-memory)* noch Millionen von Kondensatoren benötigt (Bauelemente, die elektrische Ladung zwischenspeichern). Die werden aber allmählich so klein, dass die geschilderten Probleme auch hier auftauchen. Eine Lösung ist wieder die präzise Kontrolle der benötigten Schichten durch *atomic-layer deposition*. Die Generation von DRAM-Chips, die letztes Jahr eingeführt worden ist, hat davon erheblich profitiert.

Der atomare Schichtauftrag kann auch bei der elektrischen Verbindung aller Komponenten eines Chips helfen. Die benötigten Leitungen bilden ein verzwicktes Netzwerk, das oft aus sechs bis acht Lagen von Kreuz- und Querverbindungen besteht. Jede davon entsteht in mehreren Schritten: Eine elektrisch isolierende Schicht Glas wird mit einem Linienmuster bedruckt, durch Ätzen werden daraus Rillen und die füllt man mit Metall. Traditionell ist das Aluminium, doch in den letzten Jahren erfolgte ein Wechsel zu Kupfer. Es lässt die Chips schneller arbeiten und hilft eine hohe Signalqualität zu erhalten. Kupfer verunreinigt jedoch die Kontakte, sodass eine dünne, leitende Barriere unterlegt werden muss. Das beste Verfahren dazu ist die *atomic-layer deposition*.

Es ist übrigens keineswegs trivial, Kupfer in den Rillen abzuscheiden. Viele Hightech-Ansätze wurden erprobt, doch eine altmodische Methode erwies sich als optimal: das Galvanisieren, also das elektrochemische Abscheiden von Metallen auf einer elektrisch leitenden Oberfläche. Weil dabei eine unebene Oberfläche entsteht, die noch poliert werden muss, galt dieses Verfahren zunächst als ungeeignet – ein Schleifmittel auf einem Wafer erschien vielen undenkbar. Die ersten Experimente in dieser Richtung erfolgten deshalb auch sozusagen klammheimlich. Doch die Wissenschaftler entdeckten begeistert, dass die Politur sogar störende Defekte von der Oberfläche entfernte und das Aufbringen weiterer Schichten erleichterte.

Dass es ein Verfahren aus dem 19. Jahrhundert in die Chipfertigung geschafft hat, ist wohl der Kreativität der Wissenschaftler und Ingenieure zu verdanken, die seit mehr als vier Jahrzehnten die Halbleitertechnik vorantreiben. Dass die ersten Nanochips längst auf dem Markt sind, ist ihr Verdienst. Mag auch mancher eine Revolution der Elektronik durch exotischere Formen der Nanotechnologie wie Kohlenstoffröhrchen und Quantenpunkte erwarten. Ich wette, dass Verbesserungen im Detail dank dieses Ideenreichtums auch in den kommenden Jahrzehnten die Halbleiterindustrie prägen werden. ◁

AUTOR UND LITERATURHINWEISE



G. Dan Hutcheson ist Vorsitzender des Vorstands und Präsident des amerikanischen Unternehmens VSLSI Research Inc. Die Firma unternimmt Marktstudien und Wirtschaftsanalysen für die Halbleiterindustrie. Der Wirtschaftswissenschaftler hat Modelle entwickelt, mit deren Hilfe Chiphersteller die Kosten neuer Technologien berechnen können.

2003 International Technology Roadmap for Semiconductors. Online verfügbar unter: //public.itrs.net/Files/2003ITRS/Home2003.htm

Handbook of Semiconductor Manufacturing Technology. Von Yoshio Nishi und Robert Doering (Hsg.). Verlag Marcel Dekker, 2000

Weitere Weblinks zu diesem Thema finden Sie bei www.spektrum.de unter »Inhaltsverzeichnis«.

Was kommt nach der Antibabypille?

Seit Einführung der »Pille« beschränkt sich die Entwicklung neuer Kontrazeptiva im Wesentlichen auf besseres Dosieren und Verabreichen hormoneller Verhütung. Echte Innovationen scheitern an politisch-moralischen Hürden – und paradoxerweise an der Aids-Epidemie.

Von Anna Glasier

Familienplanung ist so alt wie die Geschichte der Menschheit. Bis ins letzte Jahrhundert kamen dafür praktisch nur Verhaltensänderungen in Betracht: von völliger Enthaltsamkeit, über seltenen Koitus – insbesondere gezieltes Vermeiden des Geschlechtsverkehrs während der fruchtbaren Tage der Frau – bis zum Koitus interruptus, das heißt Rückzug des Penis vor dem Samenerguss. Bevölkerungsstatistisch gesehen ist regelmäßiges Stillen, da es die normale Eierstockaktivität unterdrückt, seit jeher ein besonders wichtiges Mittel zur Begrenzung der Fruchtbarkeit gewesen. Für das einzelne Paar hingegen spielte der Koitus interruptus – bereits im Buch Genesis erwähnt – notgedrungen die Hauptrolle.

Eine künstliche Methode der Empfängnisverhütung, das Kondom, blickt allerdings auf eine erstaunlich lange Geschichte zurück. Beschreibungen von Überzügen für den Penis gibt es schon aus dem alten Ägypten um 1350 v. Chr. Ursprünglich aus Tierdärmen, später aus Leinen oder Seide gefertigt, dienten sie vor allem dem Schutz vor Geschlechtskrankheiten. Angesichts der traditionell untergeordneten Rolle der Frau in der Gesellschaft überrascht es nicht, dass mechanische Schutzbarrieren für Frauen erst viel später aufkamen. Den ersten »Gebärmutterschleier« soll ein Amerikaner Anfang des 19. Jahrhunderts propagiert haben, und die erste Portio-, also Gebärmutterhals-Kappe wurde um 1830 in Deutschland hergestellt. Es dauerte nochmals mehr als 150 Jahre, bevor 1993 ein weibliches Kondom, das Femidom, auf den Markt kam.

Von der Spirale zur Pille

Bis in die zweite Hälfte des 20. Jahrhunderts war die einzige weitere künstliche Verhütungsmethode das Intrauterinpessar, das der Arzt in die Gebärmutter – den Uterus – einsetzt. Diese so genannte Spirale wurde erstmals in Deutschland 1909 aus Seidendarm (einem aus dem Spinnsaft der Seidenraupe gewonnenen chirurgischen Nahtmaterial) produziert, später aus Silber-Kupfer-Legierungen und schließlich aus Kunststoff. Das moderne Pessar entstand 1969, indem das Kunststoffgerüst mit feinem Kupferdraht umwickelt wurde. Dies verbesserte die schwangerschaftsverhütende Wirkung und ermöglichte zierlichere Formen. Neue Kupfermodelle verzichten ganz auf den Plastikkörper – in der Annahme, dass sich durch die zusätzliche Verkleinerung unerwünschte Nebenwirkungen verringern lassen.

Mitte der 1970er Jahre geriet die Spirale in Verruf, als gezeigt wurde, dass ein besonders Furcht erregend geformtes Modell – das Dalkon-Schild – das Risiko für Entzündungen im Beckenbereich und Unfruchtbarkeit erhöhte. Dennoch bleibt das Pessar eine der weltweit häufigsten Methoden der Schwangerschaftsverhütung, vor allem wegen seiner Verbreitung in China. Hingegen genießt die Kupferspirale in Westeuropa und den USA geringe Popularität, obwohl sie sehr effektiv, extrem sicher, fünf bis zehn Jahre lang haltbar und sehr preiswert ist.

Die Entwicklung der Antibabypille durch den amerikanischen Reproduktionsbiologen Gregory Pincus und den Gynäkologen John Rock bedeutete eine echte Revolution der Empfängnisverhütung, und die Markteinführung im Jahr 1960 schuf eine entscheidende Grundlage für die Emanzipation der Frau. Wohl kein Wirkstoff in der Geschichte der Pharmakologie wurde gründlicher untersucht, wobei die Pille sich stets als risikoarm und wirksam erwiesen hat. Dennoch ist sie ein beliebter Gegenstand von Sensationsmeldungen geblieben, und trotz der eindrucksvollen Erfolgsbilanz halten die meisten Frauen die Pille im-

Aus urheberrechtlichen Gründen können wir Ihnen die Bilder leider nicht online zeigen.

LAIF

mer noch für ein potenzielles Risiko. Dabei ist sie statistisch betrachtet natürlich viel ungefährlicher als jede Schwangerschaft.

Die jüngste Geschichte der Empfängnisverhütung dreht sich in erster Linie um hormonelle Methoden. In den ersten beiden Jahrzehnten nach Markteinführung der Pille galt es als vorrangiges Ziel, die Sicherheit zu verbessern und Nebenwirkungen zu minimieren. Die Forscher erreichten das, indem sie die Dosis an synthetischem Östrogen – Ethinylestradiol – verringerten und mit verschiedenen Varianten von synthetischen Gestagenen, den Progestagenen, experimentierten. So wurde die Östrogendosis von ursprünglich 150 auf neuerdings 15 Mikrogramm Östrogen gesenkt.

Aus Sorge, die Effektivität könnte unter solch geringen Dosierungen leiden, haben Forscher versucht, die Dauer des hormonfreien Intervalls bei jedem Zyklus von üblicherweise sieben auf fünf oder gar vier Tage zu verkürzen und zugleich anstelle der Placebo-Tablette für jeden »pillefreien« Tag eine geringe Östrogendosis zu verabreichen. Auch wurden Mehrphasenpräparate wie die Zwei- oder Dreistufenpille eingeführt, bei denen die Dosierung der einzelnen Hormone im Verlauf der 21 Behandlungstage zwei- oder dreimal wechselt, um den natürlichen Regelzyklus nachzuahmen und die Sicherheit zu erhöhen. Allerdings wurde nie gezeigt, dass diese Darreichungsformen den Einphasenpillen überlegen wären – sie sind bloß komplizierter und teurer.

Die meisten Versuche mit neuen Progestagenen hatten zum Ziel, die vermännlichende – androgene – Komponente zu mindern. Ironischerweise könnte das zu einer leicht erhöhten Anfälligkeit für Venenthrombosen und zu geringfügig verringerter Sicherheit geführt haben – Anlass für eine regelrechte Pillenpanik im Jahr 1995. Drospirenon, ein Ende 2000 in Deutschland eingeführtes Progestagen, besitzt nicht nur anti-androgene, sondern auch so genannte anti-mineralocorticoide Eigenschaften. Da Mineralocorticoide Steroidhormone sind, die vor allem den Wasser- und Mineralhaushalt regulieren, könnte Drospirenon zur verstärkten Flüssigkeitsabgabe über die Niere führen. Von den Medien wurde das Medikament darum euphorisch begrüßt als die »Pille, mit der Sie abnehmen«. In Deutschland, so geht das Gerücht, war die vermeintliche Wunderpille schon einen Monat nach Markteinführung ausverkauft.

Obwohl die Pharmaindustrie sich anscheinend noch immer vorwiegend mit Dosierung und Art der Steroide ab- ▷

▲ Die Entwicklung neuer Methoden zur Geburtenkontrolle wird durch die verbreitete Meinung behindert, das Bevölkerungsproblem sei bereits gelöst. Auch gilt es als geradezu unmoralisch, an Verhütungstechniken zu arbeiten, die nicht gleichzeitig die Übertragung des Aids-Virus verhindern. In dieser südafrikanischen Familie kümmert sich die Großmutter um 15 Kinder, seit zwei ihrer Töchter an Aids gestorben sind und eine, die sich infizierte, die Familie verlassen hat.

▷ gibt, konzentriert sich die Forschung in den letzten zwanzig Jahren auf die Entwicklung neuer Darreichungsformen. Im Prinzip ist es von Vorteil, wenn die Hormone nicht geschluckt werden und nicht durch den Magen-Darm-Trakt wandern müssen: Die Leber wird als erste Stoffwechselstation umgangen, und die Steroide gelangen gleichmäßig in die Blutbahn. Ein ganz praktischer Vorteil ist, dass der Zwang zur Compliance – zur regelmäßigen Einnahme – mehr oder weniger entfällt, während die Auswahl unter den Darreichungsformen steigt.

Hormon-Implantat statt Pille?

Anfang der 1980er Jahre wurden in mehreren Ländern injizierbare Progestagene zugelassen, insbesondere Medroxyprogesteronacetat und Norethisteronenanthat in Depotform. Die monatliche Spritze mit einer Kombination aus Östrogen und Progestagen ist heute in Zentral- und Südamerika weit verbreitet und inzwischen auch in den USA zugelassen.

Hautimplantate, die nur Progestagene enthalten, kamen in den 1990er Jahren auf den Markt. Anfangs waren es sechs mit Silikongummi beschichtete Stäbchen, die unter der Haut des Oberarms implantiert wurden (Norplant), aber bald sank die Zahl der Stäbchen auf zwei (Norplant 2, Jadelle) und schließlich auf eins (Implanon). Letzteres wirkt drei Jahre lang, und in keiner Studie gab es einen Fall, in dem die Methode versagt hätte.

Der Zusatz eines Progestagens zum Intrauterinpessar ergibt das Pessar LNG-IUS, das fünf Jahre lang wirksam ist, aber im Gegensatz zur kupferhaltigen Spirale die monatlichen Blutungen erheblich verringert. Für viele Frauen in Europa ist ein Verhütungsmittel, das fünf Jahre wirkt und von Regelbeschwerden befreit, äußerst attraktiv. Darum erreichte die Spirale, die Levonorgestrel freisetzt, beispielsweise in Großbritannien schon 2002 unter den hormonellen Verhütungsmitteln einen Marktanteil von rund zehn Prozent.

Am Ende dieser langen Liste neuer Darreichungsformen stehen der Vaginalring – jeweils 21 Tage in der Vagina getragen und sieben Tage herausgenommen – sowie ein Hormonpflaster. Beide enthalten Ethinylestradiol in Kombination mit einem Progestagen und sind seit kurzem auf dem Markt. Hingegen lassen zwei andere Applikationsformen – über ein Hautgel und mittels Nasenspray – noch auf sich warten; sie sind vorläufig nur zur Hormonersatztherapie in den Wechseljahren verfügbar. Wenn eines Tages auch sie zur Empfängnisverhütung dienen könnten, wären damit alle Verabreichungsformen der hormonellen Verhütung ausgeschöpft. Vielleicht wird die Technik sich danach in eine radikal andere Richtung bewegen.

Der Pearl-Index

Wie zuverlässig sind hormonelle Verhütungsmittel?

Der Pearl-Index ist ein statistisches Maß für die Verlässlichkeit eines Kontrazeptivums. Er gibt die Anzahl ungewollter Schwangerschaften pro hundert Jahren Verhütungspraxis an – oder die Anzahl unerwünschter Schwangerschaften bei hundert Frauen, die ein Jahr lang diese Form der Verhütung praktizierten. Das heißt: je kleiner der Pearl-Index, desto sicherer das Verhütungsmittel. Zum Vergleich: Der Koitus interruptus hat einen Pearl-Index von 35.

Aus urheberrechtlichen Gründen können wir Ihnen die Bilder leider nicht online zeigen.

BILDERBOX

Methode	Pearl-Index
Minipille	0,4 bis 4,3
Kombipräparate	0,1 bis 2,0
Intrauterinpessar mit Levonorgestrel	0,09 bis 0,2
injizierbare Progestagene	0,03 bis 0,9
Implantate	0,0 bis 0,2

(Quelle: S. Karger AG, Basel 2003)

Seit einigen Jahren wird die Idee diskutiert, man könne die Pille nicht nur zur Verhinderung von Schwangerschaften nutzen, sondern auch, um Gesundheitsvorteile zu erzielen – insbesondere, um damit die Menstruationshäufigkeit zu senken. Doch gar so neu ist diese Hypothese nicht. Wie Anfang der 1970er Jahre in Schottland demonstriert wurde, können Frauen die Pille durchaus mit weniger hormonfreien Intervallen nutzen – und möchten das auch gerne –, so dass der Abstand zwischen den Entzugsblutungen von einem auf drei Monate steigt. Vor einiger Zeit ist diese Idee in den USA wieder entdeckt worden; die Dreimonatspille Seasonale der Barr Laboratories in New Jersey ist dort seit 2003 zugelassen.

Ist Verhütung gesund?

Die Chance zusätzlicher Gesundheitsvorteile wird vielleicht den Enthusiasmus der Pharmaindustrie für die Verhütungsforschung wiederbeleben. Besonders viel versprechend scheint die Aussicht, mittels so genannter selektiver Östrogen-Rezeptor-Modulatoren (SERMs) eine Pille zu entwickeln, die das Brustkrebsrisiko senkt (siehe »Designer-Östrogene. Neuartige Prävention gegen Brustkrebs und Osteoporose« von V. Craig Jordan, Spektrum der Wissenschaft 7/1999, S. 66).

Obgleich die Verhütungsforschung auf dem Gebiet der Steroidhormone für Frauen fast zum Stillstand gekommen ist, gibt es bei anderen Methoden einige interessante Entwicklungen. Seit mehr als fünfzig Jahren ist bekannt, dass die hormonelle Empfängnisverhütung prinzipiell auch beim Mann ansetzen kann. Eine Reihe von Hormonkombinationen ist untersucht worden. Die meisten – und vermutlich die ersten, die auf den Markt kommen werden – bestehen aus einem Progestagen zur Unterdrückung der Spermienbildung sowie einem Testosteronersatz, der die Sexualfunktion aufrecht erhalten soll (siehe Spektrum Spezial 4: Schlüsseltechnologien, S. 84).

Die überaus zähe Entwicklung einer hormonellen Verhütungsmethode für Männer erklärt sich nur zum Teil durch die Schwierigkeit, eine geeignete und lange wirksame Testosteron-Substitution zu finden. Schuld ist auch die weit verbreitete Ansicht, Männer würden so etwas niemals verwenden und Frauen könnten sich nicht darauf verlassen, dass der Mann seine Pille nimmt. Doch ob-

wohl Verhütung vor allem in Entwicklungsländern immer noch als Frauensache gilt, belegen neuere Umfragen unter beiden Geschlechtern in Schottland, China, Hongkong und Südafrika, dass die Pille für den Mann einen beträchtlichen Marktanteil erobern würde. Seit die Testosteron-Ersatztherapie für ältere Männer einen riesigen Markt verspricht, lässt sich die pharmazeutische Industrie wenigstens halbherzig auch auf die Entwicklung einer hormonellen Verhütung für Männer ein.

Auch die so genannte Immunokontrazeption kommt bereits länger als nötig nicht vom Fleck. Technisch machbar sind Impfungen von Substanzen, durch die Antikörper gegen relevante Moleküle entstehen: auf der Eizelle (genauer: ihrer Glashaut, der äußeren Hülle aus Glykoproteinen), auf den Spermien sowie in der Zottenhaut des Embryos, die Choriongonadotropin erzeugt (in diesem Fall richten sich die Antikörper gegen die Beta-Untereinheit des Hormons). Indes haben gleich mehrere Faktoren bislang handfeste Fortschritte verhindert. So ist die Frage nach eventuellen Langzeitfolgen einer Immunisierung gegen menschliches Gewebe noch offen. Außerdem fürchten ausgerechnet Frauengruppen, kontrazeptive Impfstoffe könnten den Staat zu einer Familienplanung unter Zwang verführen.

Schadensersatzklagen als Bremse

Die wohl größten Erwartungen an eine wirklich neuartige Methode richten sich auf den Einsatz von Antiprogesteron. Das Antiprogesteron Mifepriston kann als täglich oder einmal monatlich eingenommene Pille verabreicht werden; es dient beispielsweise in China als Notfall-Kontrazeptivum. In vielen Ländern ist die Markteinführung hingegen am Widerstand von Abtreibungsgegnern gescheitert, denn Mifepriston wird vor allem als Abtreibungspille eingesetzt (siehe »RU 486: die Abtreibungspille« von André Ulmann, Georges Teutsch und Daniel Philibert, Spektrum der Wissenschaft 8/1990, S. 46).

Die Geschichte dieses Mittels illustriert die Schwierigkeiten, auf die fast jeder Fortschritt bei der Schwangerschaftsverhütung stößt. Natürlich ist Verhütung untrennbar mit Sex verbunden – und Sex lässt niemanden kalt. Anders als beispielsweise bei Bluthochdruckmedikamenten hat darum auch jeder eine vorgefasste Meinung zur Verhütung. Außerdem ist Kontrazeption unweigerlich mit sozialen, kulturellen, moralischen und religiösen Faktoren verwoben, die zwar nicht die prinzipielle Verfügbarkeit von Verhütungsmitteln verhindern können, wohl aber den freien Zugang.

Die zunehmende Bereitschaft zu Schadensersatzklagen, die in jedem Fall teure und Zeit raubende Prozesse nach sich ziehen, tut ein Übriges, um die Entwicklung und Einführung neuer Verfahren zu bremsen. All diese Faktoren machen die Pharmaindustrie nervös und risikoscheu, wenn es darum geht, neue Wege einzuschlagen.

In letzter Zeit hängen Fortschritte in diesem Zweig der Forschung vor allem vom Engagement gemeinnütziger Institutionen ab – etwa der Weltgesundheitsorganisation und dem Bevölkerungsrat (Population Council) der Vereinten Nationen. Doch selbst hier haben zwei wichtige Faktoren den Enthusiasmus zur Entwicklung neuer Methoden stark gedämpft. Der eine ist die Aids-Epidemie. ▷

Evolution der Spirale

Von elegant bis martialisch

Die Modellpalette von Intrauterinpessaren im Verlauf des 20. Jahrhunderts. Die Jahreszahlen geben den Zeitpunkt der Markteinführung dieser »Spiralen« in Großbritannien oder den USA an.

Aus urheberrechtlichen Gründen können wir Ihnen die Bilder leider nicht online zeigen.

Gräfenberg-Ring
1930

Lippes-Schleife
Anfang der 1960er Jahre

Saf-T-Spirale
Mitte der 1960er Jahre

Majzlin-Feder
Ende der 1960er Jahre

Dalkon-Schild
1970er Jahre

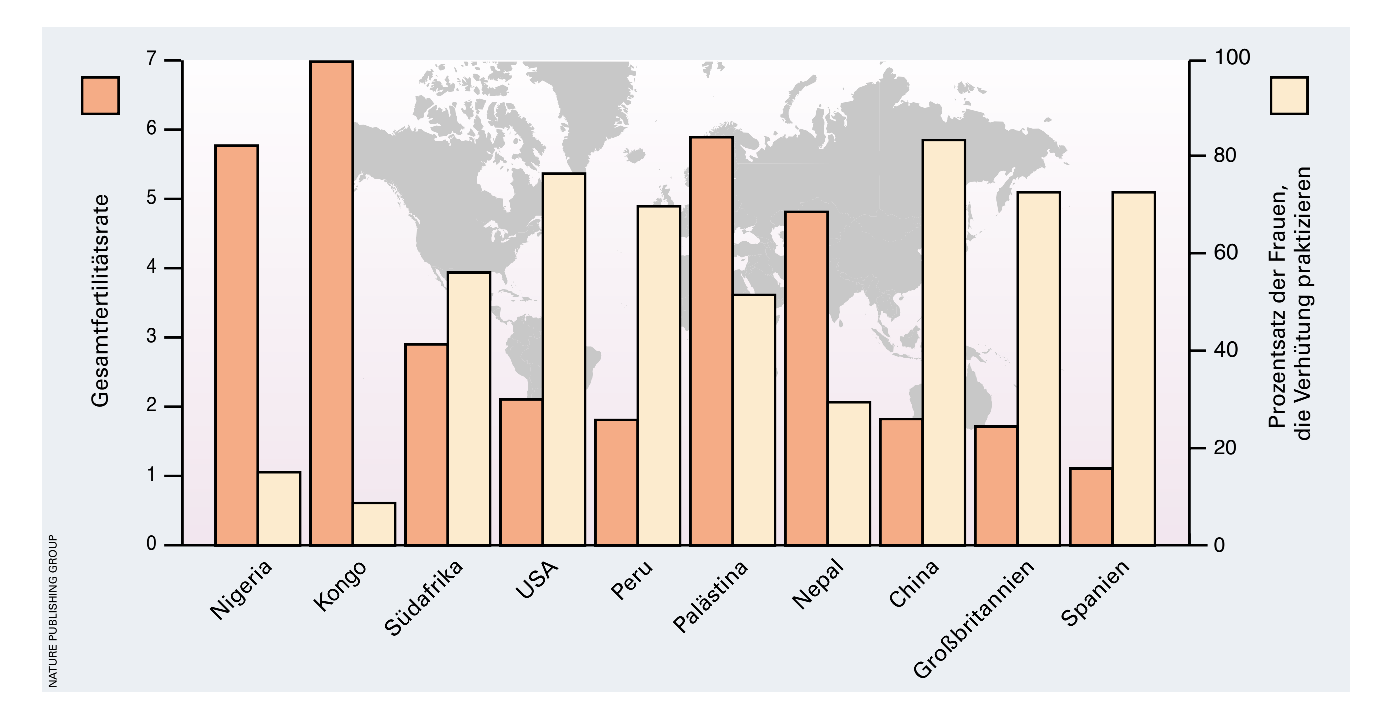
Kupfer-7
1980er Jahre

Multiload-Spirale
Anfang der 1990er Jahre

LNG-IUS
Mitte der 1990er Jahre

Gynefix
Ende der 1990er Jahre

NATURE PUBLISHING GROUP



Für einige Länder ist hier die Gesamtfertilitätsrate – die durchschnittliche Anzahl der Kinder je Frau – dem Prozentsatz verheirateter oder in Partnerschaft lebender Frauen im fortpflanzungsfähigen Alter gegenübergestellt, die Verhütungsmittel benutzen.

▷ Sie hat zwar zu einer Renaissance des Kondoms geführt und generell das Interesse an besseren Barrieremethoden belebt – wobei die Spielräume für echte Verbesserungen begrenzt sind –, aber zugleich das Interesse an neuartigen Kontrazeptiva zweifellos verringert.

Aids als Entwicklungshindernis

Ein Grund ist, dass Forschungsgelder für die Entwicklung von Mikrobiziden abgezweigt wurden, das heißt für Substanzen, die – etwa als Gel in die Vagina eingebracht – den Aids-Erreger HIV abtöten sollen. Hinzu kommt die verbreitete Ansicht, es sei geradezu unethisch, an neuen Verhütungsmethoden zu arbeiten, die nicht gleichzeitig die HIV-Übertragung verhindern.

Der zweite Hemmschuh ist die verbreitete Meinung, das Bevölkerungsproblem sei bereits gelöst. Darum betrachten die Geldgeber die Kontrazeptiva-Forschung nicht mehr als oberste Priorität. Es ist zwar richtig, dass in den dreißig Jahren zwischen 1965 und 1995 die Gesamtfertilitätsrate – die durchschnittliche Kinderzahl pro Frau – weltweit von 4,9 auf 2,8 gefallen ist. Auch lagen im Jahr 1997 die Geburtenziffern in 51 Ländern, die zusammen 44 Prozent der Erdbevölkerung stellen, unter dem Ersatzniveau – der für einen Ersatz des Elternpaars nötigen Kinderzahl – von 2,1. Doch andererseits liegt die Fertilität in den meisten afrikanischen Ländern über 5,5, und dort verwendet weniger als ein Fünftel der verheirateten Frauen Verhütungsmittel.

Nach wie vor sind die Probleme mit ungewollten Schwangerschaften weltweit enorm (siehe »Der ungedeckte Bedarf an Familienplanung« von Malcolm Potts, Spektrum der Wissenschaft 4/2000, S. 68). Trotz des vermehrten Einsatzes von Kontrazeptiva steigen die Abtreibungsraten in den meisten Ländern der Erde weiter – die Industrieländer nicht ausgenommen. Zehntausende Frauen sterben jährlich auf Grund ungewollter Schwangerschaften.

Da immer mehr Frauen in immer jüngeren Jahren Sex haben, während sie zugleich aber immer später – und weniger – Kinder in die Welt setzen, werden viele von ihnen länger als dreißig Jahre Verhütungsmittel nutzen. Die meisten Frauen werden fast alles tun, um eine ungewollte Schwangerschaft zu verhindern. Dafür nehmen sie bereitwillig die Unbequemlichkeit, die Nebenwirkungen und die – wenngleich geringen – Risiken der derzeit verfügbaren Hilfsmittel in Kauf. Vor allem in den Industrieländern führen viele Frauen ein Leben, das kaum ein Risiko für eine HIV-Infektion mit sich bringt. Jedenfalls wären viele gewillt, eine Methode zur Empfängnisverhütung zu praktizieren und zugleich etwas anderes zum Schutz vor Infektionen zu nutzen.

Die moderne Wissenschaft vermag neuerdings sogar spezielle Gene zu identifizieren, die einzig mit der Fortpflanzung zu tun haben und daher direkt oder indirekt ideale Zielscheiben für die Empfängnis- oder Schwangerschaftsverhütung bilden können. Wir verfügen über das Wissen und die Mittel, um viel bessere Verhütungsmethoden zu entwickeln. Ist es nicht äußerst selbstgefällig, weiter darauf zu bauen, dass sich die Menschen mit Schlechterem begnügen werden? ◁

AUTORIN UND LITERATURHINWEISE



Anna Glasier ist Gynäkologin. Sie lehrt und forscht am Department für Reproduktion und Entwicklung der Universität Edinburgh (Schottland).

Hormone in der Kontrazeption. Von G. Tscherne in: Promed, Bd. 5, S. 29 (2002)

Empfängnisverhütung. Von Alexander T. Teichmann. Thieme, Stuttgart 1996

Third generation oral contraceptives. Von D. C. G. Skegg in: British Medical Journal, Bd. 321, S. 190 (2000)

Weblinks zu diesem Thema finden Sie bei www.spektrum.de unter »Inhaltsverzeichnis«.

TRAFFGO

Stau im Stadion

Mit Computersimulation lassen sich Evakuierungs- und Verkehrspläne optimieren.

Von Tim Schröder

Wer während eines Rockkonzerts oder Fußballspiels schon einmal im Gedränge feststeckte, den beschlich vermutlich ein ungutes Gefühl: Wenn jetzt Panik ausbricht, wie komme ich hier raus? Diese Frage stellen sich Ingenieure und Architekten, wenn sie Konzerthäuser oder Stadien planen. Treppenhäuser und verwinkelte Gänge erschweren das Verständnis, wohin Besucher im Gefahrenfalle eilen werden. Wo bilden sich gefährliche Staus und wie lange dauert es, bis zehntausende Menschen ein Gebäude verlassen haben? Die Behörden verlangen schlüssige Evakuierungspläne für die Baugenehmigung.

Präzise Antworten liefern seit rund drei Jahren die Experten der Duisburger TraffGo GmbH – einer Ausgründung von Physikern und Ingenieuren der Universität Duisburg-Essen. Mit einem einzigartigen und verblüffend einfachen Rechenmodell simulieren sie die Bewegung von Menschen bei der Evakuierung etwa des Dortmunder Westfalenstadions (siehe Bild) oder von Fähren sowie mächtigen Kreuzfahrtschiffen. Darüber hinaus wenden die Forscher ihr Know-how auch an, um das Verkehrsaufkommen auf den Autobahnen in Nordrhein-Westfalen zu prognostizieren. Via Internet kann jeder Verkehrsteilnehmer auf die Informationen zugreifen.

Aus urheberrechtlichen Gründen können wir Ihnen die Bilder leider nicht online zeigen.

LINKS: DPA; UNTEN: TRAFFGO

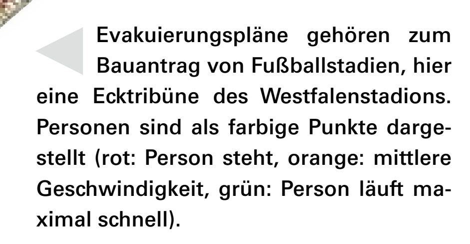
Bewegungen von Autos oder Menschenmassen wurden in der Vergangenheit oftmals mit so genannten Fluidmodellen analysiert. Die strömenden Objekte gelten darin als Flüssigkeiten. Doch die Berechnungen sind sehr aufwändig, vor allem dann, wenn sich die Menschenmassen in viele kleine Ströme aufteilen, etwa bei den einzelnen Sitzreihen eines Stadions. »Bei solch komplexen Geometrien kann man am Ende kaum verstehen, wie das Simulationsergebnis – etwa die Zeit bis zur vollständigen Evakuierung eines Stadions – zu Stande gekommen ist«, erklärt Tim Meyer-König, Gründungsmitglied von TraffGo und Leiter des Geschäftsfelds Fußgängerverkehr.

Flucht aus dem Raster

Gemeinsam mit seinen Kollegen ist er deshalb einen neuen Weg gegangen. Die Wissenschaftler entwickelten ein Modell, das Menschen wie Fahrzeuge als Software-Agenten modelliert. 100 000 Objekte lassen sich dann gleichzeitig in Bewegung setzen. Auch das klingt nach erheblichem Rechenaufwand, doch das Prinzip ist denkbar einfach. Zum Beispiel bei der Evakuierung: Wie bei einem Schachspiel eilen die Agenten von Feld zu Feld durch ein Raster aus Zellen. Jede ist 40 mal 40 Zentimeter groß, entsprechend der Standfläche eines Erwachsenen im dichten Gedränge. Das Raster umfasst die Wege im Stadion oder die Gänge auf einem Schiff. In kleinen Zeitschritten bestimmt jeder Agent die Richtung, in der das Ziel »Ausgang« liegt, und läuft dann so weit wie möglich darauf zu. Erst durch die Wechselwirkung vieler solcher Einheiten entsteht ein komplexer Ablauf durch Selbstorganisation. Sie weichen einander aus, behindern oder überholen sich.

»Damit das Modell möglichst realistisch arbeitet, werden den Agenten individuelle Eigenschaften zugeordnet«, erläutert Tim Meyer-König. Zu den Charaktereigenschaften der digitalen Dauerläufer zählt etwa die Trödelwahrscheinlichkeit, die das Zögern und Abbremsen bei der Suche nach dem Fluchtweg repräsentiert. Davon hängt die Dauer einer Evakuierung entscheidend ab. Darüber hinaus sind die Agenten mit einer individuellen Reaktionsdauer ausgestattet, mit der sie auf das Räumungssignal reagieren. Sie verfügen über eine Maximal-Geschwindigkeit, die unter anderem altersabhängig ist. Zudem sind sie unterschiedlich sensibel, wenn es darum geht, anderen Personen auszuweichen. Je nach Anwendung wird eine bestimmte demografische Zusammensetzung vorgewählt – etwa agile Jugendliche beim Popkonzert.

Die Grundzüge des Fußgänger-Simulationsprogramms entstanden vor wenigen Jahren an der Universität Duisburg-Essen. Damals plante die Internationale Schifffahrtsorganisation (IMO) neue Sicherheits- und Evakuierungsrichtlinien für Fähren und Kreuzfahrtschiffe. Die neuen Vorgaben hätten aufwändige Berechnungen der Fluchtwege erfordert. Mit dem Simulationsprogramm lag das Ergebnis innerhalb von Minuten vor. Werften wurden auf das Programm aufmerksam und förderten zusammen mit dem Bundesforschungsministerium die weitere Entwicklung. Seit Juni 2002 dürfen die von der IMO vorgeschriebenen Evakuierungsanalysen mit der TraffGo-Simulation durchgeführt werden. Der



Evakuierungspläne gehören zum Bauantrag von Fußballstadien, hier eine Ecktribüne des Westfalenstadions. Personen sind als farbige Punkte dargestellt (rot: Person steht, orange: mittlere Geschwindigkeit, grün: Person läuft maximal schnell).



Ein Containerschiff und weitere Fahrzeuge passieren die Engstelle des Rheins bei Bingen. Ob die Wasserstraße hier ausgebaggert werden muss, um dem Anwachsen des Schiffsverkehrs Herr zu werden, soll in einer aufwändigen Rechnersimulation geprüft werden.

Germanische Lloyd in Hamburg, als Klassifizierungsgesellschaft für die Sicherheit von Schiffen und technischen Anlagen zuständig, vertreibt die Lizenz weltweit. Zu den Kunden zählen die Papenburger Meyer-Werft und andere Werften sowie Brandschutzbüros im In- und Ausland.

Software-Agenten gegen Verkehrsstau

Ähnlich wie das Fußgängermodell funktioniert das Duisburger Verkehrsprognose-System. Darin sind die rund 2250 Autobahnkilometer in Nordrhein-Westfalen in einzelne Felder von 1,5 Meter Länge aufgeteilt. Fahrzeuge bewegen sich Schritt für Schritt von Zelle zu Zelle. Auf- und Abfahrten werden mit besonderen Eigenschaften belegt. So verlangsamen oder beschleunigen sie die Autos automatisch. Das System wird mit aktuellen Daten von rund 4000 Zählschleifen gefüttert. Konkurrierende Verfahren leiten Prognosen aus dem Vergleich mit historischen Daten ab – die heutige Situation gleicht der vom 30.10.1999, also wird sich der Verkehr entsprechend entwickeln.

Derzeit nutzen etwa 300 000 Autofahrer täglich den Internetservice unter www.autobahn.nrw.de, der alle 30 oder 60 Minuten aktualisiert wird. Das nächste Ziel ist die Entwicklung eines Verkehrsmanagement-Systems, das auch den innerstädtischen Verkehr berücksichtigt. Bei jährlich insgesamt 45 000 Kilometern Stau im Ruhrgebiet wäre das sicher sinnvoll.

Inzwischen tummeln sich die Duisburger auch auf den Wasserstraßen. Im Auftrag der Bundesanstalt für Wasserbau in Karlsruhe nehmen sie den Schiffsverkehr auf dem felsigen und stark gewundenen Rheinabschnitt zwischen Bingen und Koblenz unter die Lupe. Sie wollen ermitteln, ob die Zunahme des Schiffsverkehrs zu längeren Wartezeiten führen wird oder ob der Fluss aufwändig vertieft oder ausgebaut werden muss. Die bewährte Verkehrssimulation genügt in diesem Falle nicht. Ein Schiff driftet nämlich bei der Kurvenfahrt und diese Drift hängt vor allem von seiner Geschwindigkeit sowie von der Strömung ab. Auch die Breite des Fahrwassers beeinflusst die Bewegung des Schiffes. Denn eine engere Fahrrinne erzeugt einen größeren Widerstand, da sich das Wasser nur schwer verdrängen lässt.

Das Ziel der Forscher ist es zunächst, die Einzelfahrt eines Schiffes realistisch abzubilden. Dazu verwenden sie Koordinaten mit Längen- und Breitenangaben. Mitte dieses Jahres schließlich sollen erste Überholmanöver simuliert werden. Schließlich soll das Programm sogar das Verhalten der Schiffsführer erfassen. Befragungen von Kapitänen und Ergebnisse von Messfahrten stellt die Bundesanstalt für Wasserbau zur Verfügung. So werden Software-Agenten die Entscheidung mittragen, ob kostspielige Baumaßnahmen im Bereich der Loreley erforderlich sein werden. ◁

Der Biologe **Tim Schröder** arbeitet als freier Wissenschaftsjournalist in Oldenburg.

Anzeige

Virtuelle Baustelle

Deutsche und russische Experten rekonstruierten die wechselvolle Geschichte des Moskauer Machtzentrums. Daraus entstanden fünf Bauphasen des russischen Wahrzeichens als begehbare virtuelle Realität.

Von Angelika Franz

Der Moskauer Edelmann muss verzweifelt gewesen sein in jener Winternacht des Jahres 1238. Draußen vor den Toren der Stadt stehen die Horden des Batu Khan. Innerhalb der Palisaden ist an verschiedenen Stellen bereits Feuer ausgebrochen. Wie lange lässt sich Moskau noch halten? Ein paar Stunden, höchstens. In seiner Not gräbt der Adlige ein Loch in den Boden. Sollen die Mongolen doch kommen und wüten, in diesem Erdversteck werden seine Schätze sicher vor Raub und Plünderungen sein. Hastig verscharrt er, was die Soldaten des Batu Khan nicht finden sollen: einen Armreif aus schwerem Silber, die Enden mit Drachenköpfen verziert; den Schläfenschmuck einer Frau, mit zierlichen Schnüren aus filigranen Silberanhängern; Silberbarren, damals Zahlungsmittel für große Beträge; ein goldener Fingerring aus dem Orient, der seinem Träger auf Arabisch »Ruhm, Erfolg, Macht, Glück und Schmuck« verspricht, dazu Ohrgehänge, Halsreifen und -ketten.

Die mongolischen Horden haben den Schatz nicht gefunden. Doch auch sein Besitzer kam niemals zurück, um den Schmuck wieder auszugraben. Vielleicht starb er unter dem Ansturm der Angreifer. Vielleicht verkauften ihn die Mongolen in die Sklaverei. Die Kostbarkeiten jedenfalls ruhten ungestört in der Erde – 750 Jahre lang, bis er 1988 unweit des Erlöser-Tores gefunden wurde.

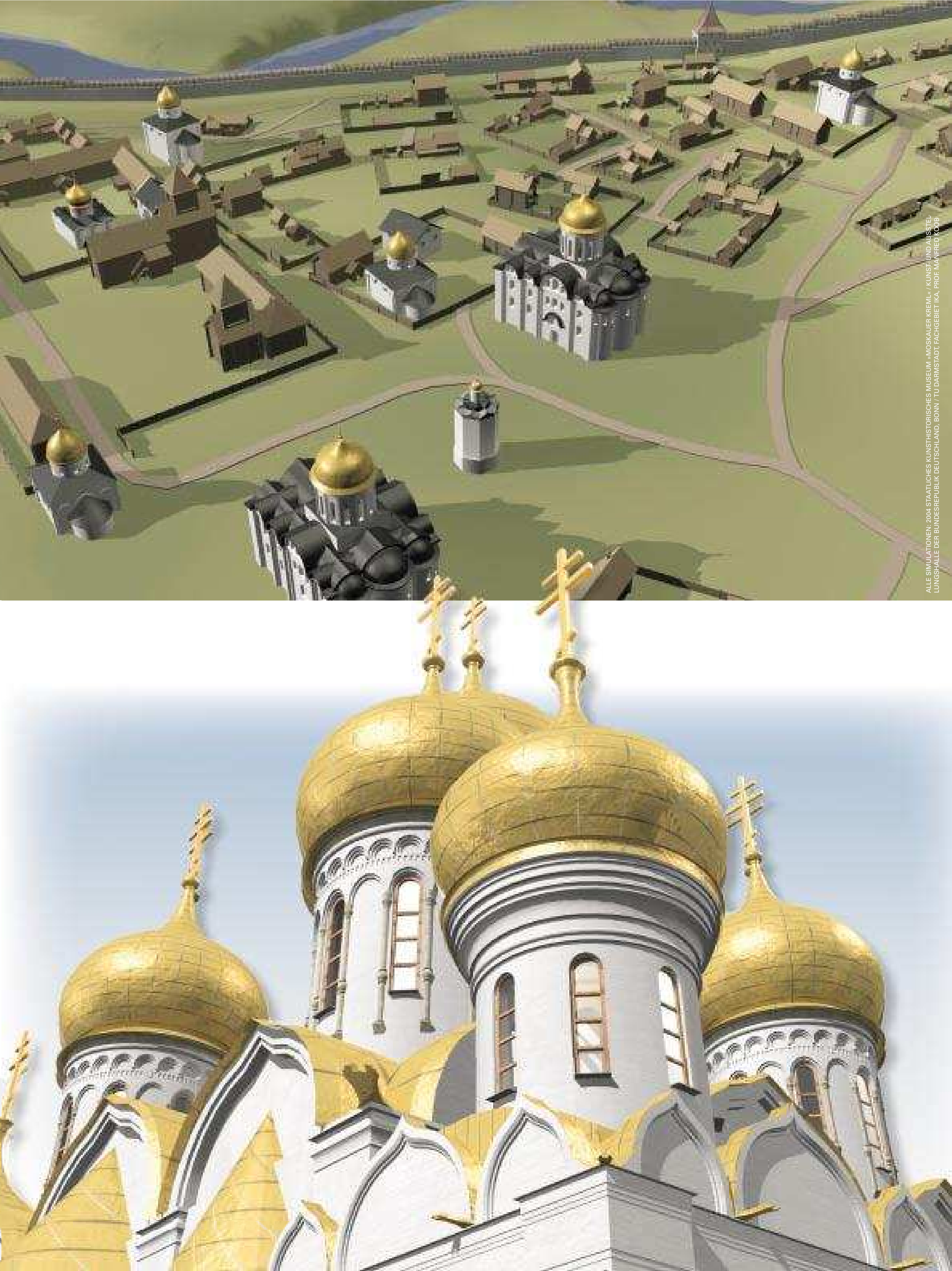
Moskau brennt in jenen Winternächten komplett nieder. Denn die Festung ist damals nur eine Ansammlung von Holzhäusern. Auf dem Hügel am Zusammenfluss von Moskwa und Neglinnaja stehen 1238 nicht viel mehr als ein paar Gehöfte und eine achteckige Holzkirche mit einem Friedhof. Ein Erdwall und eine Palisade aus Eichenpfählen bilden den einzigen Schutz der Keimzelle dessen, was einst zur mächtigsten Stadt des Russischen Reiches werden soll.

Ein Erdwall mit Palisade

Erst gegen Ende des 13. Jahrhunderts, als Alexander Jaroslawitsch Newskij, Großfürst von Wladimir, das Reich unter seinen Söhnen aufteilt und dem jüngsten, Daniil, das Gebiet um Moskau zuweist, steigt die Stadt zum Herrschersitz auf. Bald ergänzt ein Fürstenhof die Anlage auf dem Hügel. Das Wohnhaus ist zwar ebenso wie die anderen Gebäude aus Holz, ragt aber mit seinen zwei Stockwerken deutlich über die niedrigen Häuser Moskaus hinaus. Zu ebener Erde liegen die Wirtschaftsräume und eine Hauskapelle, im Obergeschoß wohnt der Fürst mit seiner Familie. Moskau benötigt nun einen besseren Schutz, als ihn der alte Erdwall bieten kann. Die Verteidigungsanlage, die in diesen Jahren entsteht, ist nach dem neuesten Stand der Technik gebaut: dem westslawisch-germanischen Rostsystem. Unter der aufgeschütteten und festgestampften Erde verleihen kreuzweise verlegte Holzbohlen der Konstruktion Stabilität. Die Palisade bekommt eine Überdachung.

Es dauert nicht lange, bis Moskau zum Zentrum der Region aufsteigt. Just hat im fernen Italien der Dichter Dante Alighieri seine »Göttliche Komödie« fer- ▷

▶ Der Kathedralenplatz des »Weißen Kreml« im 14. Jahrhundert (oben). Auf den vergoldeten Türmen der Maria-Verkündigungs-Kathedrale, gebaut von 1484 bis 1489, spiegelt sich virtuelles Sonnenlicht (unten).



▷ tig geschrieben und die katholischen Päpste residieren im französischen Avignon, da ziehen sowohl Iwan I. Kalita, Großfürst von Wladimir, als auch das Oberhaupt der russisch-orthodoxen Kirche, der Metropolit von Kiew und ganz Russland, Pjotr, in den 1320er Jahren an die Neglinnaja-Mündung. Die neuen Herren Moskaus beginnen, die Stadt entsprechend ihrem Status zu schmücken. An Stelle der Holzkirche entsteht der erste Steinbau, die Maria-Entschlafens-Kathedrale. Kurz darauf folgt der Bau der Erzengel-Michael-Kathedrale aus strahlend weißem Kalkstein. 1342 findet Iwan I. Kalita als erster Herrscher in ihr seine letzte Ruhestätte, in kommenden Jahrhunderten wird sie zur Grablege der russischen Zaren. Für die befestigte Siedlung auf dem Borowizki-Hügel fällt nun erstmals der Name »Kreml«, der sich entweder von dem russischen Wort für Festung, »Kremnik«, oder von »Krem« – Bauholz – ableitet.

Immer wieder legen Feuersbrünste die Stadt in Schutt und Asche: Die Holzhäuser brennen wie Zunder. So auch 1365, als eine vergessene Kerze einen Feuersturm entfacht, der binnen zwei Stunden die Stadt vernichtet. Der Wiederaufbau geschieht nicht mehr in Holz, sondern die Baumeister greifen – zumindest für die Repräsentativbauten – zum beständigeren Kalkstein. Die Gelegenheit ist günstig, das Areal zu vergrößern. Den Kreml umschließt nun eine weithin sichtbare weiße Mauer. Unmittelbar nach der Fertigstellung muss sie sich bewähren: Der litauische Großfürst Olgerd rückt an und belagert die Stadt. Die Mauer hält stand, und Olgerd zieht unverrichteter Dinge wieder von dannen.

Südlich des Nikolaus-Tores steht nun eine Kirche, die den Schutzpatronen der »Feuerberufe« geweiht ist. Hier, im Schatten der Kosmas- und Damian-Kirche, leben und arbeiten im 14. und 15. Jahrhundert die Gold- und Hufschmiede. Diese Ansiedlung ist natürlich ein »Spiel mit dem Feuer«. An den Festungstoren werden stets Schmiede gebraucht: Wer auf der Durchreise ist, kann hier sein Pferd beschlagen oder sein Fuhrwerk reparieren lassen. Aber die glühenden Essen sind eine ständige Gefahrenquelle für Brände. Allein in den Jahren zwischen 1453 und 1493 – während am anderen

Dreidimensionale Wiederauferstehung

1331 wird der Moskauer »Kreml« erstmalig in einer Schriftquelle erwähnt – weil er bei einer Feuersbrunst niederbrennt. Knapp siebenhundert Jahre lang wird jedermann glauben, dass das, was damals in Flammen aufging, für immer verloren sei. Doch zu Beginn des neuen Jahrtausends ermöglichen es deutsche und russische Wissenschaftler, den Kreml von einst wieder zu betreten – zumindest virtuell.

▼ 1505 bis 1508 erhielt die Erzengel-Michael-Kathedrale mit den Muschelornamenten ein für die Renaissance typisches Äußeres.

Die Mannschaft um Manfred Koob, Lehrstuhlinhaber im Fachgebiet CAD in der Architektur an der Technischen Universität Darmstadt, hat fünf historische Baustufen des Kreml wieder begehbar gemacht. Der Besucher kann nun per Mausklick über die Eichenbohlenwege des Holzkreml spazieren, wie Zoe Palaiologos in ihrer Hochzeitskutsche in den weißen Kreml einfahren, bewundern, was Iwans Architekten an Know-how aus Italien an die Moskwa brachten, oder wie Mathias Rust in der Vogelperspektive über dem Kreml des 20. Jahrhunderts einschweben.

Für seine Arbeit hat Koob fast 4000 Quellen gesichtet. Visuelle Darstellungen wie zeitgenössische Stiche oder Gemälde bildeten dabei nur einen Teil der Datengrundlage. Ebenso nutzte der Architekt Reisebeschreibungen, wie die des österreichischen Botschafters Sigismund von Herberstein, der 1526 im Auftrag von Erzherzog Ferdinand die Zarenstadt besuchte. Von Herberstein hielt fest, welche Gebäude er sah und wie deren Fassaden gestaltet waren – ein knappes halbes Jahrhundert später sind dies Informationen von unschätzbarem Wert. Für die Rekonstruktion des Holzkreml waren vor allem Ausgrabungen von zeitgleichen Gehöften außerhalb Moskaus von Interesse. Innerhalb der Kremlmauern macht die dichte Bebauung Arbeiten unter der Erde praktisch unmöglich. Erst in den letzten Jahren fanden hier an einzelnen Stellen vorsichtige Forschungen statt. Die Ergebnisse sind noch nicht veröffentlicht, flossen aber bereits in Koobs CAD-Rekonstruktion mit ein.

Die verarbeitete Datenmenge ist gewaltig. Etwa 30 Mitarbeiter und Studenten haben zweieinhalb Jahre lang den Kreml virtuell wieder aufgebaut – gegen Ende sogar in drei Tag- und Nachtschichten, um die Rechner des Instituts optimal zu nutzen. Nun können etwa 300 Gebäude wieder betrachtet und zum Teil sogar betreten werden, die seit Jahrhunderten nicht mehr existieren. Die Rekonstruktion bewegt sich auf drei Ebenen: Das Gelände mit seinen Flüssen und Hügeln ist nur schematisch dargestellt, im

Ende Europas Nikolaus Kopernikus und Michelangelo aufwachsen, in Spanien die Inquisition eingeführt wird und Kolumbus sich aufmacht, eine neue Welt zu entdecken – fällt Moskau zehnmal den Flammen zum Opfer.

Als sich 1472 die Kutsche mit Zoe Palaiologos, Nichte des letzten byzantinischen Kaisers, der Stadt Moskau nähert, sieht die Prinzessin die weißen Mauern des Kreml über der Moskwa aufragen. Sie wurde in das kalte Land im Osten geschickt, um hier Iwan III. Wassilewitsch, auch »Der Große« genannt, zu ehelichen. Papst Paul II. erhofft sich von dieser Verbindung, die 1439 auf dem Konzil von Ferrara/Florenz geschlossene Union zwischen der katholischen und der orthodoxen Kirche mit neuem Leben zu füllen und zusätzlich Moskau für eine Allianz gegen das Osmanische Reich zu gewinnen. Die Wünsche des Papstes blieben unerfüllt, doch Zoes Einfluss auf ihren Ehemann und damit auf Moskau sollen von bleibender Wirkung sein.

Die Baumeister kamen aus Venedig

Es ist wohl ihr zu verdanken, dass Iwan den Kreml im Zuge großer Umbaumaßnahmen in einem Stil gestalten lässt, mit dem die in Rom aufgewachsene Zoe seit ihrer Kindheit vertraut ist: der italienischen Frührenaissance. Der Fürst schickt einen Gesandten nach Venedig und beauftragt ihn, der besten Architekten habhaft zu werden und sie an die Moskwa zu locken – koste es, was es wolle. Und so trifft im März 1475 Aristotele Fioravanti, der bereits in Italien und Ungarn Befestigungsanlagen errichtet hat, mit seiner Bauhütte im Kreml ein. Der Meister selbst übernimmt den Neubau der 1474 durch ein Erdbeben zerstörten Maria-Entschlafens-Kathedrale. Zehn Jahre später wird auch die Maria-Verkündigungs-Kathedrale, künftig die Hauskirche der Moskauer Fürsten, neu errichtet – zeitgleich mit dem Neubau der Maria-Gewandniederlegungs-Kathedrale, die dem Metropoliten als Hauptkirche dient. Mit seinem neuen Gesicht aus rotem Backstein steht der Kreml den Befestigungsanlagen von Mantua, Turin, Verona und anderen Städten Mittelitaliens in nichts mehr nach. Die neuen Mauern sind 2,5 Kilometer lang, fünf bis neunzehn Meter hoch, 3,5 bis 6,5 Meter dick und be- ▷

Zoom werden die Gebäude als »Klötzchen« im Maßstab 1:500 sichtbar und können im Bedarfsfall bei ganz naher Betrachtung durch detaillierte Modelle bis zu einer Auflösung von 1:1 ersetzt werden. Dabei überrascht die historische Genauigkeit. Für den Holzkreml liegt die mögliche Abweichung der Rekonstruktion vom Vorbild bei knapp über zehn Prozent, für den roten Backsteinkreml des 16. Jahrhunderts sogar weit darunter.

Nicht nur wissenschaftlich, auch interkulturell ist Koobs CAD-Projekt Neuland. Was fertig rekonstruiert war, schickte der Architekt den russischen Wissenschaftlern der Geisteswissenschaftlichen Universität Moskau und des Staatlichen kulturhistorischen Museums »Moskauer Kreml«, die jede Bauphase akribisch mit ihren Forschungen abglichen. Ein reger Studentenaustausch zwischen Darmstadt und Moskau, finanziert vom Bundesministerium für Bildung und Forschung, ergänzte die Zusammenarbeit.

Noch nie ist die Baugeschichte des Kreml umfassender bearbeitet worden – Dokumente, die jahrhundertelang in verschiedenen Archiven lagen, wurden hier erstmals zusammen ausgewertet. Das Projekt, das für die Ausstellung »Gottesruhm und Zarenpracht« der Kunst- und Ausstellungshalle der Bundesrepublik Deutschland in Auftrag gegeben wurde, wird die Architekten noch bis 2006 beschäftigen. Dann geht die Installation des virtuellen Kreml auf die Heimreise – nach Moskau.



◀ Der Fürstenhof aus der ersten Phase des Holzkreml: Im unteren Geschoss befanden sich Wirtschaftsräume und Hauskapelle, im oberen Stockwerk wohnte die Herrscherfamilie.





▷ krönt von roten schwalbenschwanzförmigen Zinnen. Der Kreml gleicht nun den berühmten Burgen von Mailand und Metz – nur übertrifft er seine westeuropäischen Vorbilder noch an Größe.

Nicht umsonst trägt Iwan den Beinamen »der Große«. 1480 gelingt es ihm, die Macht der Goldenen Horde zu brechen, die Regentschaft der Mongolen ist damit vorbei.

Der Kreml wird bunt

Die Architektur des Kreml spiegelt zunehmend die Bedeutung des Fürsten. Als Audienz- und Thronhalle dient dem Herrscher ab 1491 der von Marco Ruffo und Pietro Antonio Solari gestaltete Facettenpalast, heute der älteste noch erhaltene Profanbau Moskaus. Auch Farbe hält nun Einzug in das russische Machtzentrum. In den ersten Jahren des 16. Jahrhunderts, während im fernen Italien Leonardo da Vinci an der Mona Lisa malt, entsteht die »Wunder des Erzengels Michael«-Kathedrale, die Hauptkirche des Tschudow-Klosters. Das Hauptgesims schmückt ein Fries, auf dem sich gelbe Delfine und Pflanzen vor einem türkisfarbenen Untergrund abheben. Zur gleichen Zeit erhält der Kreml auch seinen prominenten Blickfang, den Turm »Iwan der Große«.

Im Jahr 1517 – in dem Martin Luther seine 95 Thesen verfasst – schreibt der polnische Gelehrte Mathias von Miechow einen Reisebericht über seine Fahrten gen Osten. In diesem Reisetagebuch ist die älteste bekannte ausführliche Beschreibung Moskaus überliefert. Darin reiht der Professor die Stadt unter die führenden europäischen Metropolen: Er vergleicht sie mit Florenz und Prag, den Kreml mit der Burg Buda in Ungarn und die Moskwa mit Moldau und Arno.

Iwans Nachfolger – Iwan IV., auch »der Schreckliche« genannt – setzt die Arbeiten an den Repräsentationsbauten fort. Noch im Jahr seiner Krönung zum Zaren – es ist 1547 und in England besteigt gleichzeitig die als »Bloody Mary« bekannte Maria I. den Thron – lässt er die Kuppeln der Maria-Entschlafens-Kathedrale vergolden. Acht Jahre später entsteht vor den Toren des Kreml die Maria-Schutz-am-Graben-Kathedrale. Kaum sind die Arbeiten an dieser beendet, wartet schon das nächste Projekt: der Wiederaufbau der beim letzten großen Brand zerstörten Maria-Verkündigungs-Kathedrale.

Nach dem Tode Iwans IV. steht das Land am Rande des wirtschaftlichen und politischen Chaos. Mit seinem Sohn Fjodor, der zwar 14 Jahre lang auf dem Thron sitzt, aber praktisch regierungsunfähig bleibt, verstirbt 1598 dann auch der letzte Rjurikide. Das alte Herrschergeschlecht, das seine Wurzeln noch auf die Waräger (Wikinger) zurückführte, erlischt mit ihm. Erbittert wehren sich in der Folgezeit die Russen sowohl gegen den inneren Verfall als auch gegen die polnischen, litauischen und schwedischen Truppen, die 1612 den Kreml zerstören und den Kronschatz plündern. Mit dem Sieg über das feindliche Heer am 27. Oktober scheint die Gefahr vorerst gebannt. Doch ein neuer Herrscher muss her.

Auf einem zum Jahreswechsel einberufenen Reichstag einigt sich die Landesversammlung auf den erst sechzehnjährigen Michail Fjodorowitsch Romanow. Als er im Juli die Zobelkrone annimmt, begründet er die Zaren-Dynastie, die bis zur Oktoberrevolution 1917 die Geschicke Russlands bestimmen soll. Als Herrschersitz lässt sich der erste Romanow 1635 den Terem-Palast bauen.

Abkehr von Moskau

Moskau aber hat schon bessere Tage gesehen. Aus dem Bericht von Adam Olearius, Sekretär einer Gesandtschaft des Herzogs von Holstein, der in diesen Jahren auf dem Weg von Riga nach Isfahan auch durch die russische Metropole



Von Holz zu Stein: Die erste Kirche, an deren Stelle später die Entschlafens-Kathedrale errichtet wurde (links), Nikolai-Turm mit Doppeladler der Zaren (Mitte) und Tschudow-Kloster (rechts)

kommt, spricht Verachtung, wenn es heißt: »Von außen erscheint die Stadt wie Jerusalem, von innen aber ist sie Bethlehem.« Nur 1652 mit der Errichtung des Patriarchenpalastes und 1702 mit dem Bau des Arsenals werden die Gebäude des Kreml noch einmal aufgestockt. Zu der Zeit entsteht mit dem Lustschloss Versailles am französischen Hof bereits eine neue Art von Herrschersitz.

Auf westliche Kunst und Architektur richtet sich der Blick des 1682 auf den Thron gekommenen Peter des Großen. Moskau steht in den Augen des Zaren für alles Alte und Rückständige. Mit der Neugründung von St. Petersburg 1703 – dem Jahr, in dem auch die erste russische Zeitung, die »Gazette von Moskau« erscheint – setzt er ein deutliches Zeichen. In Windeseile wird die Stadt hochgezogen, bereits neun Jahre später verlegt Peter seinen Regierungssitz von der Moskwa an den Finnischen Meerbusen. Schon bald kommt die Bautätigkeit in der alten Zarenresidenz vollständig zum Erliegen – denn sämtliche Steine werden in St. Petersburg gebraucht. Doch ganz kann sich auch der große Reformer den Traditionen nicht entziehen. 1721 nimmt er nicht in seiner neuen Hauptstadt, sondern im alten Moskau den Kaisertitel an. Die Himmelfahrtskathedrale wird bis zum Ende der russischen Monarchie Krönungskirche bleiben.

In den Folgejahren dämmert die alte Metropole vor sich hin. Immerhin entsteht im Kreml 1749 noch das steinerne Winterpalais und 1755 wird die Universität gegründet. Erst als 1762 Katharina II. – die Große – den Zarenthron besteigt, erwacht Moskau aus seinem Dornröschenschlaf. Die Kaiserin hat Großes vor mit der Stadt. Sie will, wie der deutsche Graveur und Historiker der Deutschen Akademie der Künste, Jakob Stehlin, schreibt, »die alten, ungeeigneten und teilweise gefährlichen Gebäude des Kreml vollkommen abreißen und an ihrer Stelle einen Kaiserpalast im neuesten Stil erbauen«.

Katharinas neue Pläne

Den geeigneten Architekten findet sie in Wassili I. Baschenow, einem begeisterten Anhänger des Klassizismus. Er plant an Stelle der alten Palastmauer einen Neubau direkt am Ufer der Moskwa und die kleinteilige Bebauung im Inneren des Kreml – mit Ausnahme der altehrwürdigen Kathedralen – durch repräsentative Gebäude zu ersetzen.

1773 ist es so weit: Ein Holzmodell der geplanten Anlage wird auf 120 Hundeschlitten von Moskau nach St. Petersburg geschafft, um dort der Öffentlichkeit vorgestellt zu werden. Noch im selben Jahr findet die Grundsteinlegung für den neuen Palast statt. Doch nur zwei Jahre später kommen die Bauarbeiten zum Erliegen. Vielleicht überforderte das ambitionierte Bauvorhaben die finanziellen Möglichkeiten der Zarin.

Vielleicht sind die Senkung des Kreml-Hügels im Frühjahr 1775 und der drohende Einsturz der Erzengel-Michael- und der Maria-Verkündigungs-Kathedralen für die Aufgabe der Pläne verantwortlich zu machen. Bekannt ist nur, dass, während in Deutschland die letzte Hexe auf dem Scheiterhaufen brennt und der junge Wolfgang Amadeus Mozart als Wunderkind durch die Salons reist, in Moskau die bereits abgerissene Südseite des Kreml ohne Neuerungen wieder aufgebaut wird.

In diesem Zustand sieht Napoleon Bonaparte den Kreml, als er im September 1812 in Moskau einzieht. Doch die ▷



Aus urheberrechtlichen Gründen können wir Ihnen die Bilder leider nicht online zeigen.

MAURITIUS

◁ Kaum unterscheidbar: Realität oder CAD? Links der Computer-Nachbau der Maria-Entschlafens-Kathedrale aus dem Jahr 2003, oben rechts ein Foto der »echten« Kirche, errichtet 1475 bis 1479.

▷ Stadt, die er triumphal erobern wollte, ist leer. Von 250 000 Einwohnern sind gerade einmal 15 000 geblieben: fast alle davon Bettler und Gefängnisinsassen. Den Sträflingen war die Amnestie versprochen worden, wenn sie bleiben und überall in der Stadt Brände legen würden. Der kräftige Wind, der Napoleon entgegenbläst, als er vom verlassenen Kreml hinunter auf Moskau blickt, facht die Flammen noch an. In nur vier Tagen brennen 8500 Häuser nieder. Vier Fünftel der Stadt sind damit zerstört. Hier gibt es für Napoleons Soldaten nichts mehr zu holen. Die ersten Einheiten verlassen die Stadt am 19. Oktober 1812 um 2 Uhr nachmittags. Doch für den Rückmarsch ist es bereits zu spät im Jahr – der Winter trifft die Truppen mit unerbittlicher Härte. Von den 530 000 Soldaten, die einstmals mit der Grande Armée auszogen, kehren kaum 40 000 nach Frankreich zurück.

Moskau entsteht neu wie ein Phönix aus der Asche, die Napoleons Invasion hinterlassen hat. Schnell sind die Holzhäuser wieder aufgebaut, die großen Steinbauten haben kaum Schaden genommen. Die Kremlschätze, für die 1810 eigens eine Rüstkammer fertig gestellt wurde, konnten die Russen rechtzeitig evakuieren: Sie überdauerten die Belagerung unbeschadet in Nowgorod. Zwei Jahre später ziehen sie wieder in die Rüstkammer ein. Sie bilden das Glanzstück im ersten Museum Russlands, in dem auch die von den Franzosen erbeuteten Kanonen ausgestellt sind.

1917 gibt es keinen Zaren mehr. Und damit kehrt auch die neue Regierung der Zarenstadt St. Petersburg den Rücken – Wladimir Iljitsch Uljanow, genannt Lenin, verlegt 1918 den Regierungssitz zurück an die Moskwa. Der neue Wind, der nun durch die altehrwürdigen Kathedralen des Kreml weht, sorgt für groß angelegte Umbaumaßnahmen. 1929 müssen alle Klöster, einst Ausdruck orthodoxer Macht im russischen Regierungsbezirk, einer Militärschule und einer Parkanlage weichen. Sechs Jahre später verschwindet ein weiteres Zeichen einstiger Pracht: Der Doppeladler, der 450 Jahre lang als Wappentier der Zarenfamilie über den Kreml-Toren prangte, wird durch den roten Stern ersetzt.

Mathias Rust auf dem Roten Platz

Schließlich fallen 1968 mit dem Marsstall und der Rüstkammer weitere architektonische Relikte der Zarenzeit. An ihrer Stelle entsteht der Kongresspalast, in dem sich bei Tagungen der KPDSU bis zu 6000 Parteimitglieder versammeln können. So sieht der Amateurpilot Mathias Rust die Anlage vor sich auftauchen, als er mit seiner Cessna 172 B am 28. Mai 1987 das sowjetische Radar unterflogen hat und zum Landeanflug auf dem Roten Platz ansetzt: Der Kongresspalast Seite an Seite mit der Maria-Entschlafens-Kathedrale, die einst den ersten Kirchbau aus Holz ersetzte, der Erzengel-Michael-Kathedrale, in der in weißen Steinsarkophagen unter Bronzeplatten die russischen Zaren ruhen, und der Maria-Verkündigungs-Kathedrale, die nie von den italienischen Baumeistern umgestaltet wurde, sondern als einzige Kreml-Kirche allein ihren russischen Formen treu blieb. In jenem Mai konferierten noch die Parteigenossen im Kongresspalast, seitdem hat sich die Nutzung des Gebäudes entscheidend gewandelt. Heute spielen in ihm Popgrößen wie Sting und Joe Cocker, wenn sie auf Tournee in die russische Hauptstadt kommen.

Über Jahrhunderte verdichtete sich im Kreml sowohl die politische als auch die religiöse Macht des russischen Reiches. An keinem anderen Ort der Welt teilten sich Kirche und Staat ein derart enges Territorium für ihre Repräsentationsbauten. Seit dem 14. Jahrhundert ist Moskau das pulsierende Herz des größten Flächenstaats der Erde. Und jedes russische Kind weiß: »Über Moskau geht nur der Kreml und über dem Kreml ist nur noch Gott.« ◁

AUTORIN UND LITERATURHINWEIS



Als **Angelika Franz**, Redakteurin bei »Abenteuer Archäologie«, im Sommer 2002 den Kreml besuchte, brannte es schon wieder in Moskau: Rund um die Stadt stand der Torf in Flammen.

Der Kreml. Gottesruhm und Zarenpracht. Katalog zur gleichnamigen Ausstellung in der Kunst- und Ausstellungshalle der Bundesrepublik Deutschland, Bonn 2004

Weblinks zu diesem Thema finden Sie bei www.spektrum.de unter »Inhaltsverzeichnis«.



URGESCHICHTE

Steven Mithen

After the Ice

A Global Human History 20,000 – 5000 BC

Weidenfeld & Nicolson, London 2003. 622 Seiten, £ 25,–

Das Mesolithikum (mittlere Steinzeit), die Zeit der nacheiszeitlichen Jäger und Sammler, war lange Zeit Stiefkind der Archäologie. Erst seit 1927 hat es seinen Platz in der heute allgemein gültigen Gliederung der Vorgeschichte. Aber noch das mehrbändige »Handbuch der Vorgeschichte« von Hermann Müller-Karpe (1966) verschweigt es fast gänzlich, und in »Fischers Weltgeschichte« von 1972 erscheint es nur als Periode der Entkräftung und Verarmung. Funde waren spärlich; unter den Fachleuten allgemein bekannt waren allenfalls die Schädelnester der Ofnet-Höhle in Süddeutschland, vielleicht noch die mesolithische Siedlung von Lepenski Vir am Eisernen Tor, einer wildromantischen Donaulandschaft zwischen Serbien und Rumänien.

Erst in jüngerer Zeit gab es nach 150 Jahren archäologischer Forschung echte Überraschungen. Die umfangreichen Entdeckungen der letzten Dekaden haben alle früheren Abhandlungen veralten lassen. Erst Steven Mithen füllt mit dem vorliegenden Buch die dadurch aufgerissene Lücke.

Was macht das Mesolithikum so wichtig? Der von Mithen gewählte Zeitrahmen umschreibt das für die Entstehung der heutigen Zivilisation zentrale Geschehen: den Wandel vom Jäger zum Bauern. Weltweit findet dieser Prozess erst nach der Eiszeit, also nach 10 000 vor unserer Zeitrechnung statt, doch hat er natürlich seine Vorgeschichte, und die lässt sich heute weitaus detaillierter und dramatischer zeichnen als bisher. Viele Fragen nach dem Wo, Wie und Warum sind noch offen, doch ist deutlich, dass die üblichen Vorstellungen von bescheidenen und primitiven Anfängen dörflichen bäuerlichen Lebens nicht die ganze Wahrheit sein können: Heute kennen wir monumentale Bauwerke sesshafter Jäger.

Das Thema ist also spannend und bedeutend. Wird der Autor der gestellten Aufgabe gerecht? Steven Mithen ist Prähistoriker und Kenner der Materie. Er präsentiert den neuesten Forschungsstand, kennt viele der Ausgrabungsstätten aus eigener Anschauung und ist selbst als Ausgräber tätig. In »Prehistory of Mind« (1996) hatte er sich mit Entstehung und Wirken der Gattung *Homo sapiens* auseinander gesetzt. »After the Ice« bildet in gewisser Weise die Fortsetzung dieses Werks.

Mithen wählt für sein Buch eine originelle Form mit erzählerischen Elementen: Er moderiert das Geschehen und führt eine fiktive Person namens John Lubbock auf einer Zeitreise hin zu den Menschen und Plätzen der Vergangenheit. Der Name des Reisenden ist Programm: Der britische Archäologe, Biologe und Politiker John Lubbock (1834 – 1913) folgte 1865 mit dem Werk »Prehistoric Times« als einer der Ersten nicht der biblischen Chronologie, die der Welt nur ein Alter von 6000 Jahren zumisst. Der vielseitige Gelehrte vollzog auch als Erster die Teilung der Steinzeit in zwei große, sehr unterschiedliche Phasen, nachdem der Däne Christian Thompson 1837 die archäologischen Fundmaterialien nach Stein-, Bronze- und Eisenzeit klassifiziert hatte.

Heute ist klar, dass die Menschen der Altsteinzeit, des Paläolithikums, als Jäger und Sammler lebten und die bäuerliche, nahrungsproduzierende Lebensweise, die entscheidende Errungenschaft des Neolithikums, noch nicht kannten. Dass das wesentlich später zwischen beide Perioden eingeschobene Mesolithikum kein Lückenfüller ist, sondern der Wegbereiter der neuen Zeit, dass der »Neolithisierungsprozess« landschaftlich sehr unterschiedlich und nicht synchron ablief, sondern sich als wechselvolle Geschichte darstellt, das ist das Thema von »After the Ice«.

»Prehistoric Times« im Reisegepäck, konstatiert der moderne John Lubbock immer wieder, was 150 Jahre archäologischer Forschung zu bewegen vermochten. Die Reise beginnt in Vorderasien, in der Landschaft, in der die »Neolithisierung« früher als in anderen Regionen der Welt stattfand. Von hier führt ihn sein Weg nach Europa, Amerika, Süd- und Ostasien und Afrika. Angesichts dieser Weltumrundung sieht man es Mithen gerne nach, dass der von ihm geführte Reisende zuweilen nur die angloamerikanische Forschung im Blick hat und manche andere wichtige Unternehmung übersieht. Hätte Mithen dem modernen John Lubbock noch ein weitere Reiselektüre mit auf den Weg gegeben, die »Weltgeschichte der Steinzeit« von Oswald Menghin (1931), so wäre dem Leser nicht nur aufgefallen, wie viele neue Erkenntnisse mittlerweile angefallen sind, sondern auch, um wie viel attraktiver Steven Mithen die Vermittlung dieser Erkenntnisse gelungen ist.

Allen Geschichtsinteressierten, die ein englischsprachiges Werk als Lektüre nicht scheuen, wird »After the Ice« einen faszinierenden Überblick über eine Sparte der prähistorischen Archäologie vermitteln, der zurzeit Aufsehen erregende Neuentdeckungen vergönnt sind.

Klaus Schmidt

Der Rezensent ist promovierter Archäologe und arbeitet in der Orientabteilung des Deutschen Archäologischen Instituts in Berlin.



Diese junge Frau wurde um 4800 v. Chr. in Vedbæk nördlich des heutigen Kopenhagen begraben, gemeinsam mit ihrem Neugeborenen, das auf einen Schwanenflügel gebettet wurde.

ZOOLOGIE

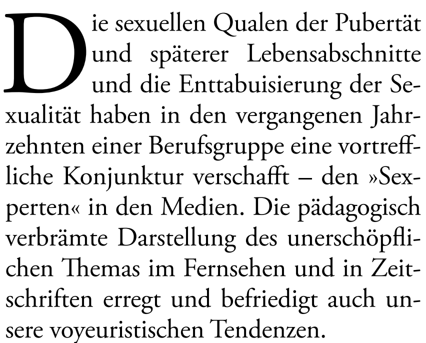
Olivia Judson

Die raffinierten Sexpraktiken der Tiere

Fundierte Antworten auf die brennendsten Fragen

Aus dem Amerikanischen von Hainer Kober.
Heyne, München 2003. 368 Seiten, € 18,–





Die sexuellen Qualen der Pubertät und späterer Lebensabschnitte und die Enttabuisierung der Sexualität haben in den vergangenen Jahrzehnten einer Berufsgruppe eine vortreffliche Konjunktur verschafft – den »Sexperten« in den Medien. Die pädagogisch verbrämte Darstellung des unerschöpflichen Themas im Fernsehen und in Zeitschriften erregt und befriedigt auch unsere voyeuristischen Tendenzen.

Die Probleme des Menschen verblassen jedoch völlig gegenüber der schockierenden Libertinage im Tierreich mit hemmungsloser Promiskuität, Inzest oder gar der Tötung des Partners während der Kopulation. Da ist es nur konsequent, wenn eine gewisse Dr. Tatiana in Großbritannien sich Tieren aller Klassen und Ordnungen als Ratgeberin in Fragen der Sexualität anbietet. Die furchtlose Briefkastentante schreckt vor keinem Problem zurück und verbindet in ihren Antworten Rat mit ausführlichen und lehrreichen biologischen Exkursen. Der vorliegende Band versammelt ihre ergötzlichen Kolumnen; die tierischen Sexualpraktiken wie im deutschen Titel als »raffiniert« zu bezeichnen, wirkt angesichts des teils deftigen Inhalts eher abwegig.

Dr. Tatiana geht nach einem recht einheitlichen, aber nie langweilig werdenden Muster vor. So entgegnet sie einer besorgten Nagel-Manati-Mutter – einer karibischen Seekuh –, deren ganzer Stolz, ihr prächtiger Sohn, ständig mit anderen Männchen knutscht, kurz und forsch: Sie solle homosexuelle Handlungen ihres Sohnes tolerieren und ihn nicht zu einer Änderung zwingen. Es folgt ein mehrseitiger Exkurs über – allerdings nicht völlig zufrieden stellende – evolutionsbiologische Erklärungsversuche homosexuellen Verhaltens.

Hinter der Ratgeberin verbirgt sich die junge Biologin Olivia Judson, Schülerin des einflussreichen Evolutionsbiologen William Hamilton und ehemalige Wissenschaftsredakteurin des angesehenen Magazins »The Economist«, in dem Dr. Tatiana vor einigen Jahren zum ersten Mal auftreten durfte. Judson beweist in ihren Darlegungen höchste Sachkompetenz und repräsentiert zugleich die besten Traditionen eines unterhaltsamen britischen Qualitätsjournalismus. Ihr Buch ist weit davon entfernt, nur billigen und oberflächlichen Wissenschafts-Pop anzubieten: Die mehr als 40 Seiten detaillierter Anmerkungen und das umfangreiche und aktuelle Literaturverzeichnis sind eines fortgeschrittenen Lehrbuchs würdig. Jedem, der auf unkonventionelle und amüsante Weise in die Geheimnisse und Herausforderungen der Verhaltens- und Evolutionsökologie eingeführt werden möchte, sei dieses Buch wärmstens anempfohlen.

Olivia Judson bietet eine hervorragende Einführung in eine Sichtweise, die als »Konflikttheorie« der Sexualität bezeichnet werden kann. Die geschlechtliche Fortpflanzung ist nämlich nur auf einen ersten, oberflächlichen Blick ein Modell der Gegenseitigkeit und Kooperation. Die beiden Geschlechter arbeiten zusammen, weil beide jeweils die Hälfte ihrer Gene durch den gemeinsamen Nachwuchs weiterverbreiten – aber damit hat die Einigkeit schon ein Ende. Die Partnerwahl, die Anzahl der Partner, die Dauer und Zahl der Kopulationen oder der Aufwand bei der elterlichen Pflege sind Punkte, bei denen ernsthafte Uneinigkeit zwischen den Geschlechtern bestehen kann. Nur bei einer treuen, lebenslangen Monogamie sind die Fortpflanzungsinteressen von Männchen und Weibchen identisch. Dieses Paarungssystem ist allerdings nur selten im Tierreich aufzufinden.

Die klassischen, aus den sechziger und siebziger Jahren des vergangenen Jahrhunderts stammenden Theorien der Soziobiologie behaupteten, dass Weibchen kein Interesse an mehr als einem Partner pro Brutsaison haben sollten. Judson alias Dr. Tatiana profitiert von einer Revision dieses Bildes, die in den letzten zehn Jahren stattgefunden hat. Auch Weibchen dürfen promiskuitiv sein, sie können bei verschiedenen Partnern nach guten Genen »shoppen«, auf

unterschiedlichste Weise für Konflikte sorgen, indem sie die Konkurrenz zwischen Männchen anstacheln und ausnutzen, und zu unterschiedlichsten Lösungswegen beitragen. Eine anschaulichere Einführung in dieses aktuelle Forschungsgebiet als in Judsons Buch dürfte kaum zu finden sein.

Vermögen aber auch menschliche Briefkastenonkel und -tanten von Dr. Tatiana etwas für ihre tägliche Praxis zu lernen? Wohl kaum. Beim Menschen – und wohl auch bei anderen Primatenarten – hat das Sexualverhalten komplexe soziale und symbolische Funktionen übernommen und ist nicht mehr zwangsläufig eng an die Fortpflanzung gekoppelt. Zu den zutiefst menschlichen, manchmal romantischen, manchmal tragischen Geschehnissen um Liebe und Sex hat die Evolutionsbiologie daher meist nur wenig Hilfreiches zu sagen. Die den Menschen dienenden Sexperten müssen weiterhin auf ihre soziale, kulturelle und psychologische Erfahrung zurückgreifen.

Thomas P. Weber

Der Rezensent ist wissenschaftlicher Assistent am Institut für Tierökologie der Universität Lund (Schweden) und Buchautor.



TEILCHENPHYSIK

Martinus Veltman

Facts and Mysteries in Elementary Particle Physics

World Scientific, London 2003. 348 Seiten, $ 48,– (hardcover), $ 19,– (paperback)

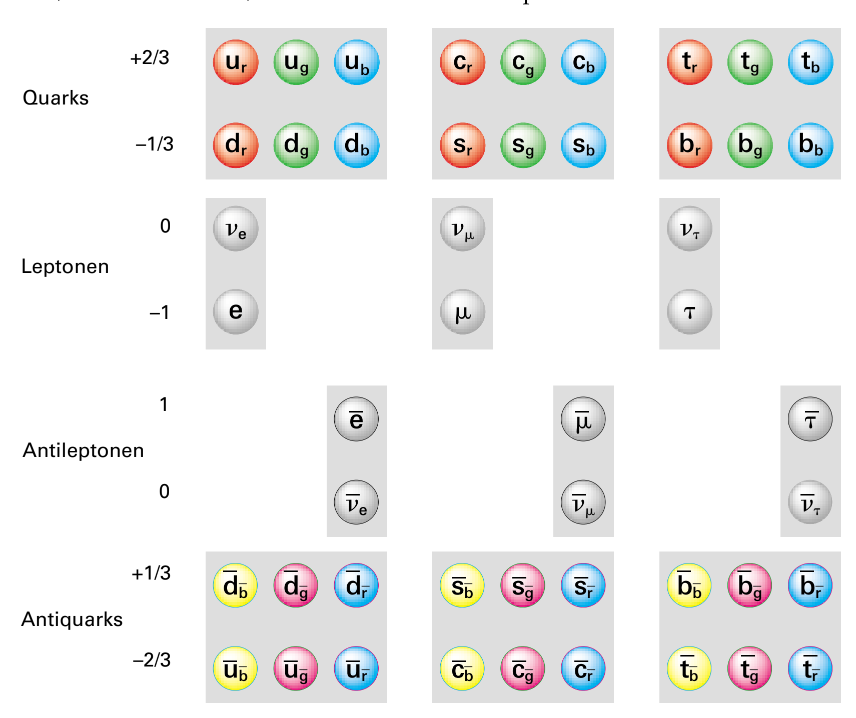
Martinus Veltman, einer der beiden Physiknobelpreisträger des Jahres 1999 – der andere ist sein ehemaliger Doktorand Gerardus 't Hooft –, hat hier eigentlich zwei Bücher geschrieben, die durch den persönlichen Stil des Autors zusammengehalten werden. In dem einen, kürzeren, porträtiert er mehr oder weniger respektvoll ausgewählte Protagonisten der Elementarteilchenphysik des 20. Jahrhunderts. Es beginnt mit Max Planck und endet mit Victor Weisskopf, dem früheren Generaldirektor des europäischen Kernforschungszentrums Cern. »Er war in meinen Augen der beste, den wir je hatten«, kommentiert Veltman seine Amtszeit, während er über dessen Nachfolger, den Nobelpreisträger Carlo Rubbia, zu berichten weiß, dass er seine Sekretärinnen im Dreiwochenrhythmus wechselte. Damit war deren Überlebenszeit in seinem Vorzimmer geringer als »die eines Matrosen auf einem U-Boot oder Zerstörer im Zweiten Weltkrieg (18 beziehungsweise 6 Wochen)«.

Eine Seite mit Bildern ist jeweils einem bis drei Beschriebenen gewidmet. Diese Seiten sind eine Lust zu lesen und oft auch anzusehen, vor allem für den Laien, der herausgehobene Physiker selten anders als würdig bei würdigen Gelegenheiten zu sehen bekommt. Erfrischend ist das Eingeständnis des Autors, dass er die Bilder auch nach der leichten Beschaffbarkeit ausgewählt hat.

Über Wilhelm Conrad Röntgen, der nach Auskunft einer viel beachteten Fernsehserie nicht einmal zu den hundert größten Deutschen zählt, sagt Veltman: »Medizin ohne Röntgenstrahlen ist heute kaum vorstellbar. Wenn je ein Mensch den Kriterien des Nobelpreises entsprochen hat (›den größten Beitrag zum Wohle der Menschheit geleistet zu haben‹), war es zweifellos Röntgen.«

Sehr persönlich und ohne Rücksicht auf Mehrheitsmeinungen ist auch das zweite, physikalische Buch in diesem Buch. Da Veltman ein theoretischer Physiker ist, wäre zu erwarten, dass die Theorie mit ihren Prinzipien die Hauptrolle spielt. Weit gefehlt! Experimentelle Fortschritte werden liebevoll und ausführlich beschrieben, aber Prinzipien wie Symmetrie, Lokalität und Kausalität, durch die andere Bücher dem allgemeinen Publikum die Physik der Elementarteilchen nahe zu bringen versuchen, treten fast nicht auf. Statt ihrer stellt Veltman die Physik so dar, wie er in seiner täglichen Arbeit mit ihr ficht.

Das erste Computerprogramm, mit dem verwickelte Elementarteilchenprozesse berechnet werden können, stammt von ihm. Dies ist ein folgenreiches Verdienst, aber für das Buch eher eine Erschwernis; denn hier ist der Autor zu Hause und kennt keine Gnade mit dem Leser. Das einschlägige Kapitel 9 »ist vielleicht das wichtigste in diesem Buch, aber für viele auch das schwerste«. So ist es. Denn in diesem Kapitel will er die Physik der Elementarteilchen durch das nur kompliziert darstellbare Kriterium ▷



Das komplette Sortiment der Elementarteilchen mit Spin 1/2. Alle Teilchen einer Zeile tragen die gleiche elektrische Ladung (angegeben in Vielfachen der Elementarladung).

der Berechenbarkeit von Prozessen zugänglich machen – statt umgekehrt, wie es verwandte Schriften tun, Verhältnisse von Zahlenwerten zunächst durch Prinzipien wie Symmetrie zu begründen und sie dann zu verwenden. Als Beispiel für Eingeweihte: Kopplungskonstanten sind laut Veltman nicht deshalb gleich, weil deren Träger in der Theorie gleichberechtigt auftreten, sondern damit ihre Gleichheit unakzeptables Verhalten bei hohen Energien verhindere. Sozusagen zufällig folgen hieraus die kaum erwähnten Symmetrien der Theorie.

Und hätte doch bitte ein aufmerksamer Lektor dieses Buch durchgesehen. Was dem Wissenschaftler in der Regel als Trivialität gilt, dem Leser aber nicht egal sein kann, sind stumpfsinnige Fehler wie die mehrfache Verwendung der falschen Einheit Kilometer pro Stunde (statt pro Sekunde) auf S. 23. Solche Fehler und Ungenauigkeiten treten mehrmals auf.

Dies gesagt, wie es Rezensentenpflicht ist, empfehle ich das Buch nachdrücklich. Wem? Eigentlich jedem, der für die Ergebnisse physikalischer Grundlagenforschung und/oder ihre Protagonisten Interesse aufzubringen vermag. »Tatsachen und Mysterien der Physik der Elementarteilchen« sind aus origineller Sicht dargestellt. Mysterien im Sinn dieses Buches sind Tatsachen, die (noch?) der Erklärung harren – Weshalb gibt es gerade drei Generationen von Elementarteilchen? –, aber auch Tatsachen, die zwar professionell, nicht aber populärwissenschaftlich begründet werden können. Spekulationen ohne im Detail erwiesenen Tatsachenhintergrund wie die Stringtheorien rechnet Veltman nicht zu den Mysterien und lässt sie aus.

Insgesamt: Zwei Bücher in einem, das wegen Spaß und Information unbedingt lesenswert ist.

Henning Genz

Der Rezensent war bis zu seiner Pensionierung 2003 Professor für Physik mit dem Arbeitsgebiet »Theorie der Elementarteilchen« am Institut für Theoretische Teilchenphysik der Universität Karlsruhe.

WISSENSCHAFTSGESCHICHTE

Peter Galison

Einsteins Uhren, Poincarés Karten

Die Arbeit an der Ordnung der Zeit

Aus dem Englischen von Hans Günter Holl.
S. Fischer, Frankfurt am Main 2003. 382 Seiten, € 24,90

Wenn Albert Einstein sein Wohnhaus in der Berner Kramgasse verließ und sich auf dem Weg zu seinem Arbeitsplatz, dem Patentamt, nach links wandte, fiel sein Blick auf einen jener berühmten Uhrtürme, die an 26 Plätzen mit Schweizer Präzision exakt dieselbe Zeit anzeigten. Der 26-Jährige hatte eine Idee: Die Zeit ist nicht absolut, wie Newton behauptet hatte. Sie ist relativ in dem Sinne, dass Gleichzeitigkeit immer nur über den Austausch von Signalen festgelegt werden kann. Damit war die Relativitätstheorie geboren, oder doch zumindest eine ihrer zentralen Ideen. Einstein kam zugute, dass Bern ein Zentrum der Uhrensynchronisation war.

Nein, so einfach war es natürlich nicht. Peter Galison, allseits bekannter Wissenschaftshistoriker an der Harvard-Universität, erhebt auch keineswegs den Anspruch, eine psychologische Erklärung der Leistung Einsteins vorzulegen. Vielmehr will er am Beispiel von Einstein und Poincaré zeigen, wie ganz unterschiedliche Einflüsse – auch und gerade diejenigen der Praxis – bei der Entstehung einer umwälzenden Theorie zusammenspielten. Dabei gibt es keinen geraden Weg von der Praxis zur Theorie (»fortschreitende Sublimierung«) oder umgekehrt (»Niederschlag«). Vielmehr sieht der Autor »Opaleszenz«: ein dynamisches, instabiles Gleichgewicht zwischen Theorie und Praxis. Dieser interessante Ansatz wird den Wissenschaftstheoretikern und -historikern einigen Diskussionsstoff liefern.

Galison wendet sich jedoch keineswegs nur an die Experten. Sein Buch ist lebendig und interessant geschrieben, kommt fast ohne Vorkenntnisse aus und vermittelt eine Fülle allgemein interessanter, spannender Informationen.

Der größere Teil des Buchs beschäftigt sich mit Henri Poincaré (1854–1912). Im Unterschied zu Einstein verlief seine Karriere geradlinig und ganz im Sinne französischer Elitebildung: Primus im Gymnasium in allen Fächern mit Ausnahme von Sport und Zeichnen, des-



Von diesem Kontrollraum aus wurden um 1880 die öffentlichen Uhren von Paris durch pneumatische Signale synchronisiert.

gleichen in der hyperelitären École polytechnique, Besuch der hoch angesehenen École des mines mit Abschluss als Bergwerksingenieur, ein halbes Jahr in diesem Beruf tätig, dann endlich Mathematiker an der Universität Caen, wenig später in Paris, Mitglied der Académie des sciences und der Académie française, einer der produktivsten Mathematiker aller Zeiten. Soweit die allgemein bekannten Fakten.

Galison macht uns aber auf die weniger bekannten Aspekte seines Lebens aufmerksam: Als Ingenieur scheut Poincaré weder Mühe noch Arbeit, um ein Bergwerksunglück aufzuklären, als Mitglied des Pariser »Bureau des longitudes« muss er sich um die weltweite Koordinierung der Zeit Gedanken machen und ist in die Auseinandersetzungen über die Lage des Nullmeridians ebenso involviert wie in diejenigen um die Dezimalisierung der Zeit; als theoretischer Physiker hätte er beinahe den Nobelpreis bekommen; seine populärwissenschaftlichen und wissenschaftstheoretischen Bücher wurden zu Bestsellern. Das geläufige Bild von Poincaré als Musterbeispiel des weltabgewandten Theoretikers wird von Galison schlagend widerlegt.

Eine Auseinandersetzung mit dem Konzept der »lokalen Zeit« von Hendrik Antoon Lorentz gipfelte 1906 in dem Aufsatz »Sur la dynamique de l'électron«, in der Poincaré der Relativitätstheorie in vielen Punkten unabhängig von Einstein sehr nahe kam. Anhänger dieser Theorie kamen in Zeiten des Nationalsozialismus auf die Idee, Poincaré als Beleg für den »arischen« Ursprung der Relativitätstheorie ins Feld zu führen, was den Diskussionen um dieses Thema bis heute einen unguten Beigeschmack gibt.

Einsteins Tätigkeit als Experte II. Klasse im Berner Patentamt gilt allgemein als stumpfsinniger Broterwerb; aber auch dieses einseitige Bild wird von Peter Galison überzeugend zurechtgerückt. Er weist nach, wie fruchtbar für den »Bastler« Einstein die Arbeit in Bern war – unter anderem, weil er sich hier intensiv mit allen Fragen der Chronometrie beschäftigen musste: Theorie im Dienste der Praxis. Wir erfahren manches auch über den jungen Rebellen Einstein, die Diskussionen mit seinen Freunden in der von ihm selbst gegründeten Akademie »Olympia« und ihre Auseinandersetzung mit erkenntnistheoretischen Klassikern wie Mach, Pearson und eben auch Poincaré.

Im Vergleich der beiden Helden erscheint Einstein als der vorbehaltlose Erneuerer, der die Prinzipien der Physik ähnlich penibel prüft wie den Patentantrag für ein neues System der Uhrenkoordination. Poincaré dagegen ist ein Bewahrer, tief geprägt vom Geiste der Aufklärung – verkörpert in der Dritten Republik – mit ihrem Glauben an den Sinn vernünftiger Übereinkünfte (paradigmatisch realisiert durch die Meter- und die Längengradkonvention) und vom Geist der Polytechnique.

Galisons Buch ist ein bemerkenswerter Versuch, die traditionell säuberlich getrennten Ebenen des Biografischen, des Sozial- und des Ideengeschichtlichen durch eine integrale Darstellung zu überwinden, und das an einem der faszinierendsten Themen aus der Geschichte der exakten Wissenschaften.

Klaus Volkert

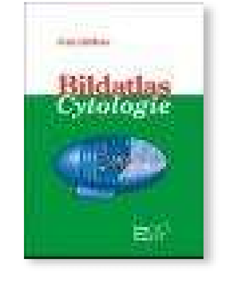
Der Rezensent ist Professor für Didaktik der Mathematik an der Universität zu Köln.

ZELLBIOLOGIE

Fritz Höffeler

Bildatlas Cytologie

Harri Deutsch, Frankfurt am Main 2003. 135 Seiten, € 29,80



Dieser Bildatlas soll ein Repetitorium sein. Die Mischung aus gleichen Teilen Text und Farbbild soll Studierenden helfen, den Stress bei der Prüfungsvorbereitung zu mindern.

Zwangsläufig bietet das Buch somit nur eine Auswahl der Fakten, mit denen man vorher im Lehrbuch und in der Vorlesung konfrontiert war. Mein Instinkt sagt mir, dass ich als Student mir eher das Lehrbuch und die Vorlesungsnotizen ein weiteres Mal vorknöpfen würde, als mich auf die Auswahl eines anderen zu verlassen. Andererseits gibt es unter den Studierenden der Medizin und Biologie sicher genügend Kundschaft für einen Bildband der vorliegenden Art.

Die Gliederung des Ganzen, vom Allgemeinen zum Speziellen fortschreitend, erscheint sinnvoll. Der Text ist wegen der angestrebten Kürze zwangsläufig eher stichworthaft. Das Seitenlayout, insbesondere mit den Hauptüberschriften, die lediglich in der Kopfzeile aufgeführt sind und nicht gleich erkennen lassen, wo das Kapitel anfängt, ist ebenso gewöhnungsbedürftig wie die Farbcodierung, aber wer den Band wirklich durchackern will, wird mit diesen Besonderheiten rasch vertraut.

Die Abbildungen sehen auf den ersten Blick sehr professionell aus, mit all ihren 3-D-Effekten und Farbschattierungen. Es sind auch genügend elektronenmikroskopische Aufnahmen eingestreut, um uns daran zu erinnern, dass die Zelle in Wirklichkeit nicht so glatt, rund und aufgeräumt ist, wie sie in den vereinfachenden Grafiken erscheint. Enttäuschend ist, dass bei den grafischen Darstellungen von Molekülstrukturen – trotz der Schattierungen, die Dreidimensionalität vortäuschen sollen – die Chiralität nicht ersichtlich ist, da alle Bindungen in derselben Ebene zu liegen scheinen.

Problematisch wird die Verwendung der Bilder dort, wo der unbefangene Betrachter einen falschen Eindruck gewinnen kann. Auf Seite 4 ist ein Kasten mit zwei Zellen abgebildet, unter der Überschrift »Der Progenot«. Im Text heißt es hingegen, den Progenot »hat es vermutlich nicht gegeben«. Auf der folgenden Seite mag ein hinreichend naiver Leser den Eindruck gewinnen, dass Archaeen und Eubakterien in einer Art unsymmetrischer Zellteilung aus einer einzelnen Urzelle hervorgingen. In beiden Fällen erwächst das Problem aus dem Versuch, Aussagen über die Evolution von Populationen mit Abbildungen einzelner Zellen zu illustrieren.

Bei der Kürze des Textes besteht natürlich stets die Gefahr, dass sich mit der Vereinfachung auch Fehler einschleichen. Das (für mich) störendste Problem dieser Art ist die wiederkehrende Behauptung, das Ribosom sei ein Multienzymkomplex. Hier wären ein paar Worte mehr nötig gewesen, um klarzustellen, dass das Ribosom nur eine einzige enzymatische Funktion hat (die Peptidyltransferase), dass diese Funktion von der ribosomalen RNA ausgeführt wird (somit handelt es sich um ein Ribozym, nicht um ein Protein-Enzym), und dass alle weiteren mit der Proteinbiosynthese assoziierten enzymatischen Funktionen von unabhängigen Enzymen ausgeführt werden (zum Beispiel Elongationsfaktoren und tRNA-Synthetasen), die ihrerseits nicht Bestandteil des Ribosoms sind. Überdies wäre hier ein elektronenmikroskopisches oder röntgenkristallografisches Strukturbild des Ribosoms nützlich gewesen.

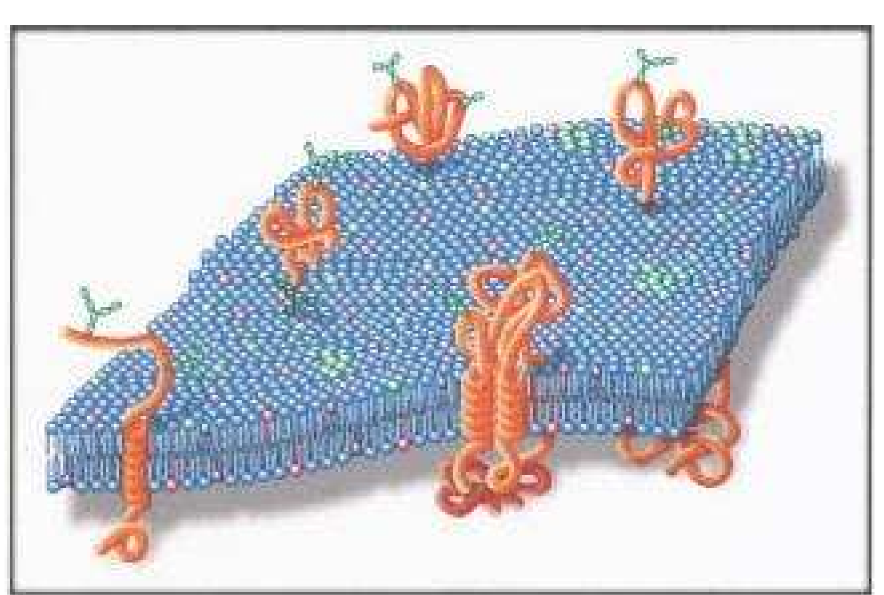
Alles in allem würde ich nicht empfehlen, dieses Buch als einzige Informationsquelle über die heutige Zellbiologie zu benutzen. Wer zusätzlich zum Lehrbuch noch eine Zusammenfassung aus anderem Blickwinkel konsultieren möchte, mag es nützlich finden. Dem Titelbegriff »Atlas« wird wohl am ehesten das beiliegende Poster mit einer 3-D-Darstellung der tierischen, der pflanzlichen und der Bakterienzelle gerecht. Man kann ohne Zweifel schon eine ganze Menge über die Zelle lernen, wenn man sich dieses Bild an die Wand hängt und gelegentlich davor meditiert.

Michael Groß

Der Rezensent ist promovierter Biochemiker, freier Wissenschaftsjournalist und »Science Writer in Residence« am Birkbeck College in London. 

Bestandteile des Cytoskeletts im Größenvergleich (oben); Modell einer typischen Biomembran (unten; Aufsicht auf die Membran-Außenseite)







NORBERT TREITZ

Auch im Spiegelbild ist dieses Wort richtigherum zu lesen. Kein Wunder: Im Spiegel sehen wir die Rückseite der Klötzchen.

Spiele mit ebenen Spiegeln

Der seitenrichtige Blick ins eigene Gesicht oder auf den eigenen Hinterkopf, der virtuelle Kopfstand und die unendlichfache Adventskerze – alles wird möglich durch wenige, geschickt angeordnete Spiegel.

Von Norbert Treitz

Warum vertauscht eigentlich ein Spiegel rechts und links, aber nicht oben und unten? Viele Leute zerbrechen sich darüber den Kopf, aber die Antwort ist ganz einfach: Ein Spiegel vertauscht weder rechts und links noch oben und unten. Wenn er wie üblich vor mir an der Wand hängt, vertauscht er vorn und hinten. Ich sitze im Friseurstuhl und lese im Spiegel vor mir den Werbespruch, der für den Betrachter von außen auf die Schaufensterscheibe hinter mir gepinselt ist – seitenrichtig! Rechts bleibt rechts, und oben bleibt oben, aber man sieht die Rückseite vom Spruch (Bild oben). Wenn Sie Ihre rechte Hand zum Gruße gegen den Spiegel erheben, sind im Spiegelbild wie im direkten Blick der Daumen links und die Fingerspitzen oben, aber Sie sehen direkt den Handrücken und im Spiegel die Innenseite.

Dass wir naiverweise annehmen, der Spiegel an der Wand vertausche rechts und links, liegt an der weit gehenden Links-rechts-Symmetrie des Menschen (wie der meisten Wirbeltiere). Wenn unser Spiegelbild uns seine Vorderseite zuwendet, aber trotzdem die Füße unten und den Kopf oben hat, so ist die einfachste Deutung, dass wir links »seine« rechte Hand sehen. Was scheint der Spiegel zu tauschen, wenn wir seitwärts auf dem Sofa vor einem Wandspiegel liegen?

Die Beziehung zwischen einem Objekt und seinem Spiegelbild ist geometrisch die Ebenensymmetrie; sie wäre nur dann eine echte Kongruenz, wenn man eine Bewegung durch die vierte Dimension realisieren könnte, analog zum Umklappen einer ebenen Figur durch die dritte Dimension in ihre alte Ebene. Herbert G. Wells (1866–1946) beschreibt in seiner fantastischen »Plattner Story« von 1896, wie auf solche Weise das Herz auf die falsche Seite wechseln kann.

Ein Objekt, das selbst keine Ebenensymmetrie hat, unterscheidet sich von seinem Spiegelbild wie die rechte von der linken Hand. Entsprechend nennt man diese Eigenschaft Händigkeit und kennzeichnet sie – zum Beispiel in der Chemie – durch ein Vorzeichen. Das ist sinnvoll, weil die Ebenenspiegelung und damit der Wechsel der Händigkeit bei geradzahlighäufiger Anwendung wieder das Original liefert.

Zwei Spiegel im Winkel: Um uns selbst so zu sehen, wie es die anderen Menschen tun, also nicht spiegelbildlich, nehmen wir eine gerade Zahl von Spiegeln, am einfachsten zwei in zueinander rechtwinkligen Ebenen, stellen sie so auf, dass ihre Ebenen eine (zunächst) vertikale Schnittgerade haben, und blicken entlang der winkelhalbierenden Ebene hinein. Das Hauptbild in der Mitte ist doppelt gespiegelt und hat damit unsere eigene Händigkeit, wie mit Augenzwinkern festzustellen ist. Dreht man nun die Schnittkante um die Blickachse, so dreht sich das Bild doppelt so schnell (Bild unten).

Mehrfachreflexion: Was geschieht, wenn der Winkel zwischen den Spiegelebenen von 90 Grad verschieden ist? Beim vorsichtigen Zuklappen der Spiegel bekommt man das nächste zusammenpassende Bild bei 60 Grad. Es hat aber die verkehrte Händigkeit, trotz der geraden Zahl der Spiegel. Des Rätsels Lösung: Im Lichtweg kommt jeweils ein Spiegel doppelt vor, der andere nur einfach. Insgesamt wird also das Licht dreimal reflektiert. Wenn man aber nun den Apparat um die Blickachse dreht, so dreht sich das Spiegelbild nicht etwa dreimal so schnell, sondern – gar nicht!

Jedesmal, wenn der Winkel zwischen den Spiegeln den Wert $180°/n$ mit ganz-





ELKE REINECKE

Zwei abgeschnittene Ecken einer Pappkiste dienen dazu, zwei Spiegelkacheln im rechten Winkel aneinanderzukleben. Das doppelte Spiegelbild dreht sich doppelt so schnell um die Blickachse wie die Spiegel selbst.

zahligem n hat, sieht man das eigene Gesicht mit nicht mehr und nicht weniger als genau einer Nase. Was wird aus den Drehungen um die Blickachse? Es ist schon verblüffend: Bei ungeraden n dreht sich nichts, und die Händigkeit ist wie beim einfachen Wandspiegel, also »verkehrt«. Bei allen geradzahligen n findet man dagegen das Gleiche wie bei den schon betrachteten 90 Grad, also ein Bild der »richtigen« Händigkeit, das sich doppelt so schnell dreht wie die Spiegelanordnung (Bild rechts oben).

Man kann den Doppelspiegel auch so benutzen, dass man denselben Gegenstand sowohl einfach als auch zweifach, dreifach … reflektiert sieht. Stellt man ein Objekt (zum Beispiel eine Adventskerze) in den von den Spiegeln begrenzten prismenförmigen Raum, so sieht man es entsprechend dem Winkel mehrfach (Bild rechts). Ein sparsamer Mensch kommt auch am vierten Advent noch mit einer Kerze und zwei Spiegeln aus; er könnte eine unendlich lange Adventszeit bestreiten, wenn die Kerze hinreichend dünn und die Spiegel hinreichend gut sind.

Zwei parallele, einander zugewandte Spiegel ergeben eindrucksvolle Bilder, wenn man bei einem davon in der Mitte ein Loch in die Spiegelschicht schabt (zum Beispiel mit einem abgerundeten Messer). Man sieht dann ein kleines Objekt zwischen ihnen unendlich oft in einer Reihe, abwechselnd mit richtiger und verkehrter Händigkeit (Bild rechts unten). Kleine Abweichungen von der parallelen Position verbiegen diese Reihe – was nicht ohne Reiz ist –, kleine Abstandsklötzchen gleicher Höhe können solche Abweichungen verhindern.

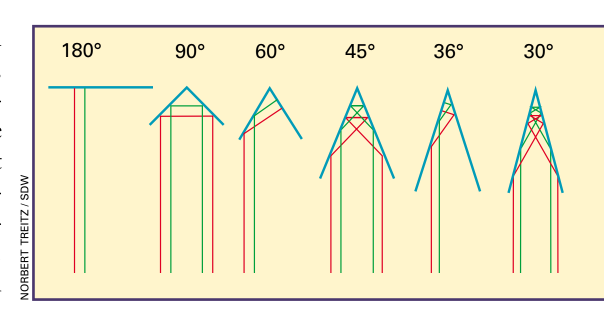
Periskope: In der einfachsten Form besteht der »Rundblicker« (so die wörtliche Übersetzung von »Periskop«) aus zwei parallel zueinander gestellten Spiegeln, an denen der Blick rechtwinklig abgelenkt wird. So kann man über die Köpfe anderer Menschen hinweg waagerecht blicken, ohne sich auf einen Stuhl zu stellen, oder aus einem untergetauchten U-Boot über Wasser zum Horizont sehen. Will man in verschiedene Richtungen des Horizonts sehen, kann man das ganze Periskop um die vertikale Achse drehen. Wenn der Platz aber eng ist, vor allem im U-Boot, dreht sich nur der obere Spiegel. Dann aber dreht sich auch das Bild der Außenwelt um die Blickachse: Es steht bei einer Vierteldrehung auf der Seite und bei einer halben auf dem Kopf (Bild nächste Seite oben).



Das kann man sich so plausibel machen: Stellen Sie sich das Rohr senkrecht vor, zunächst nur mit dem unteren Spiegel mit der 90-Grad-Ablenkung. Sie blicken in diesen Spiegel waagerecht hinein und sehen damit den Himmel über dem Rohr. Kippen Sie nun in Gedanken den Spiegel fast in die Waagerechte und blicken Sie steiler von oben hinein, sodass Sie immer noch durch das Rohr den Himmel sehen. Was Sie vom Himmel sehen, hat sich dabei nicht gedreht – denken Sie sich ein markantes Sternbild oder einen Buchstaben aus Kondensstreifen, den ein Reklameflugzeug hinterlassen hat. Wenn Sie jetzt um das Rohr herumgehen und den Spiegel um die Rohrachse mitdrehen, dreht sich das Bild des Himmels für Sie im umgekehrten Sinne, und zwar einmal pro Umlauf. Das geschieht aber genauso, wenn Sie nicht steil, sondern waagerecht in den entsprechend justierten Spiegel blicken.

Nun hat das Periskop oben noch einen Spiegel, und wenn der den Blick in die Waagerechte ablenkt, liefert er statt der Zenitumgebung eine Gegend nahe am Horizont. Beim Drehen des unteren Spiegels um die Vertikale und Umwandern dreht sich der Horizont einmal pro Umlauf um die Blickachse, so als ob die Objekte dort auf dem Horizont abrollen würden. Wenn Sie nun das untere Ende des Geräts unverändert lassen und waagerecht hineinschauen, aber den oberen Spiegel um die Vertikale drehen, gibt es ebenso dieses Abrollen der Horizontgegenstände: Wenn Sie mit dem Periskop hinter sich sehen, steht das, was Sie sehen, auf dem Kopf.

Aus Karton kann man ein solches drehbares Periskop aus zwei ineinan- ▷



▲ Strahlengang für die Winkel 180°/n zwischen zwei Spiegeln für n von 1 bis 6, jeweils für einen rot und einen grün gezeichneten Strahl. Ein parallel zur Winkelhalbierenden einfallender Strahl kommt genau in Gegenrichtung zurück, sodass vorn und hinten vertauscht werden. Für ungerade n ist das schon alles, sodass die Anordnung wie ein gewöhnlicher Wandspiegel wirkt. Bei geraden n werden darüber hinaus noch rechts und links vertauscht, sodass die Händigkeit wieder die originale ist. Drehung der Anordnung um die Blickachse dreht hierbei das Spiegelbild doppelt so schnell.

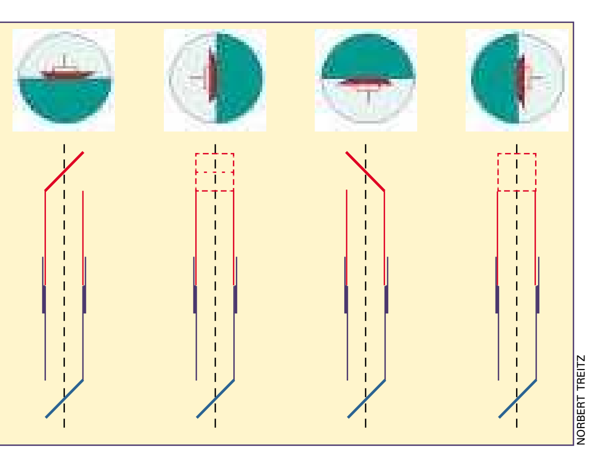


MATHEMATIKUM GIESSEN / FOTO: ROLF K. WEGST



ELKE REINECKE

▲ Der achtfache Pinguin entsteht durch zwei Spiegel im Winkel von 45 Grad (das verstellbare Spiegelpaar steht im »Mathematikum« in Gießen), der unendlichfache Igel durch zwei parallele Spiegel.


NORBERT TREITZ

So sieht man ein Schiff am Horizont, wenn man die beiden Hälften dieses primitiven Periskops gegeneinander verdreht.

▷ der steckenden Rohren und zwei aufgesetzten Taschenspiegeln basteln.

Drei Spiegel frei nach Amici: Zum Ausgleich dieser Drehung eignet sich das Umkehrprisma von Giovanni Battista Amici (1786–1863), der sich – neben vielen anderen Dingen – durch die Konstruktion zahlreicher optischer Instrumente einen Namen machte. Für unsere Zwecke können wir das Amici-Prisma durch eine Anordnung aus drei Spiegeln ersetzen. In der einfachen Freihandversion klebt man einfach drei rechteckige Taschenspiegel oder Spiegelkacheln mit fünfeckigen Seitenwänden aus Karton zusammen. Zwei Personen können sich dann gegenseitig in die Augen und dabei kopfstehend sehen, in dem sie entlang der Geraden durch die Mittelpunkte der beiden oberen Spiegel peilen (Bild unten). Wenn man die Spiegel um die gemeinsame Blickachse dreht, sehen sich beide gegenseitig rotieren, und zwar doppelt so schnell. Bei einem Drehwinkel von 90 Grad werden nicht mehr oben und unten, sondern links und rechts vertauscht, vorne und hinten bleiben aber nach wie vor erhalten.

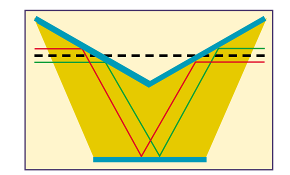
Ein Spiegel-Eck besteht aus drei Spiegeln, die sich, mit den spiegelnden Seiten nach innen, wie drei benachbarte Flächen eines Würfels in einer Ecke treffen. Man blickt mit einem Auge ungefähr parallel zur Raumdiagonalen des Würfels hinein und sieht sein Gesicht ein halbes Mal um die Blickachse gedreht mit verkehrter Händigkeit. Auch wenn man die Anordnung dabei etwas verdreht, sodass immer noch alle drei Spiegel benutzt werden, bewegt sich das Bild nicht, und man sieht sich weiterhin in der Mitte: ideal für Egoisten. Die gleiche Reflexion in genau die Rückwärtsrichtung kann man auch mit Totalreflexion in Prismen bewirken. Nach diesem Prinzip arbeiten die im Straßenverkehr verwendeten »Katzenaugen«: Jedes Fahrzeug bekommt relativ viel von seinem eigenen Licht zurück.

Das große Kaleidoskop: Man stelle drei große Spiegel (1 m hoch, 1,5 m breit, unterer Rand 1 m über dem Fußboden) im Dreieck auf und gehe in gebückter Haltung hinein. Nach dem Aufrichten sieht man sehr viele – sozusagen unendlich viele – schöne Menschen und kann sich überlegen, ob man sich klonen lassen und solcher Konkurrenz aussetzen möchte. Die Hälfte dieser Klone – genauer: einer mehr als die Hälfte – hat allerdings die verkehrte Händigkeit. Auch der Blick auf den eigenen Hinterkopf ist seitenverkehrt. Seitenrichtig geht es mit vier statt mit drei Spiegeln, die auf den Seiten eines Quadrats stehen (Bild rechts).

Der innen verspiegelte Würfel ist die Erweiterung dieses Prinzips: Auch Boden und Decke der würfelförmigen Kammer sind verspiegelt. Verwenden Sie – bequem und genau – pro Kante je zwei Fischertechnik-Klötzchen mit Rillen, um die quadratischen Kacheln zusammenzustecken, und schnüren oder kleben Sie das Ganze dann wie ein Paket zusammen. Eine Fläche können Sie verschiebbar lassen, um einen besseren Einblick zu gewinnen und kleine Figuren mit erkennbarer Händigkeit hineinzuhängen.

Man sieht ein theoretisch dreidimensional-unendliches Gitter mit einer Elementarzelle, von dem der Spiegelwürfel ein Achtel (mit halber Kantenlänge) ist. Die anderen sieben sind seine Spiegelbil-

Beim Blick durch die Amici-Spiegel sieht man sein Gegenüber auf dem Kopf (linkes Bild, der schmale Streifen über dem direkten Durchblick). Drehung der ganzen Anordnung lässt das Spiegelbild mit der doppelten Geschwindigkeit rotieren (rechts).

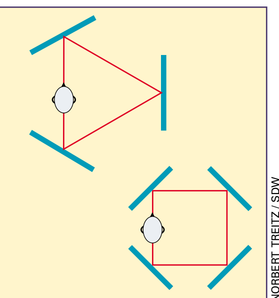


NORBERT TREITZ


ELKE REINECKE







Mit drei Spiegeln sieht man den eigenen Hinterkopf – seitenverkehrt. Die richtige Händigkeit liefert das Vier-Spiegel-Kaleidoskop, das auch aus einem Schaf eine unendliche Herde macht.

der, drei davon mit richtiger und vier mit verkehrter Händigkeit.

Besonders eindrucksvoll wirkt ein leuchtendes Taschenlampenbirnchen, das halb rot und halb grün angemalt ist. Wo kommt nur das viele Licht von dem einen kleinen Birnchen her? Normalerweise sehen wir von ihm nur das Licht, das in den kleinen Raumwinkel geht, den unsere Pupillen einnehmen. Mit den vielen Spiegelungen bekommen wir nun auch noch Licht, welches das Birnchen in andere Richtungen ausstrahlt. ◁



Norbert Treitz ist apl. Professor für Didaktik der Physik an der Universität Duisburg-Essen. Seine Vorliebe für erstaunliche und möglichst freihändige Versuche und Basteleien sowie anschauliche Erklärungen dazu nutzt er nicht nur für die Ausbildung von Physiklehrkräften, sondern auch zur Förderung hochbegabter Kinder und Jugendlicher.

Spiele mit Physik! Von Norbert Treitz. 4. Auflage, Harri Deutsch, Frankfurt (Main) 1996

Nüsse & Rosinen. Von Norbert Treitz. CD mit Buch. Harri Deutsch, Frankfurt (Main), in Vorbereitung

The Plattner Story. In: The Complete Short Stories. Von Herbert G. Wells. Ernest Benn, London 1927

Weblinks zu diesem Thema finden Sie bei www.spektrum.de unter »Inhaltsverzeichnis«.

PREISRÄTSEL

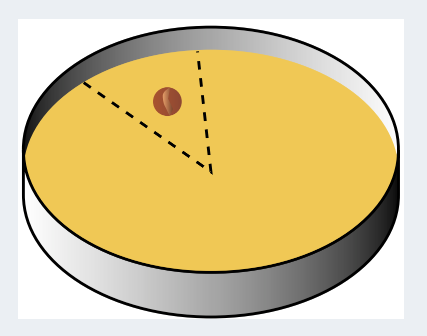
Der Nusskuchen

Von Pierre Tougne

Oma Maus bäckt zum Kindergeburtstag ihren berühmten Haselnusswunschkuchen. Dazu versenkt sie in einem Rührteig, der in eine kreisrunde Kuchenform mit senkrechten Wänden und einem Durchmesser von 20 cm gefüllt ist, an völlig zufälliger Stelle eine kugelrunde Haselnuss von 1 cm Durchmesser.

Der Kuchen soll in zehn gleiche Stücke zerteilt werden. Dabei sollte die Nuss nicht angeschnitten werden (wer sie in seinem Stückchen findet, darf sich sein Lieblingsspiel wünschen).

Wie groß ist die Wahrscheinlichkeit, dass dieses Malheur eintritt? Und wie groß müsste der Nusskuchen sein, damit sie genau 1 zu 10 beträgt?



Schicken Sie Ihre Lösung in einem frankierten Brief oder auf einer Postkarte an Spektrum der Wissenschaft, Leserservice, Postfach 104840, D-69038 Heidelberg.

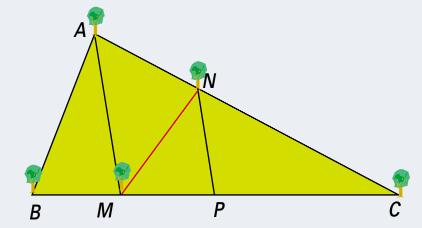
Unter den Einsendern der richtigen Lösung verlosen wir drei Strategiespiele »Blokus«. Der Rechtsweg ist ausgeschlossen. Es werden alle Lösungen berücksichtigt, die bis Dienstag, 15. Juni 2004, eingehen.

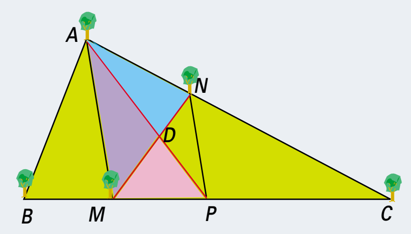
Korrektur zum Rätsel vom Mai 2004

Eine entscheidende Bedingung ist versehentlich weggelassen worden – wir bitten um Entschuldigung! Und zwar müssen nicht nur die Nachbarfelder einer zu legenden Fliese andere Farben haben als die Fliese selbst, sondern auch das Feld, auf das sie gelegt wird.

Der Einsendeschluss wird aus diesem Grund auf Dienstag, den 15. Juni, verschoben.

Lösung zu »Die Weidenhalbierung« (April 2004)





Jan verbindet M und A, konstruiert den Mittelpunkt P der Strecke $\overline{BC}$ und die Parallele zu MA durch P. Deren Schnittpunkt mit AC ist N, der Punkt, an dem der Baum gepflanzt wird.

Warum? Die Seitenhalbierende $\overline{PA}$ zerlegt das Dreieck ABC in zwei flächengleiche Teile. Die Dreiecke AMP und AMN sind ebenfalls flächengleich (gemeinsame Grundseite $\overline{AM}$ und gleiche Höhe). Da beide das Dreieck AMD enthalten, müssen auch MPD und NAD flächengleich sein. Indem man NAD durch MPD ersetzt, wird aus APC (mit dem halben Flächeninhalt von ABC) das flächengleiche Dreieck NMC, was zu beweisen war.

Wenn M rechts von P liegt, gerät N auf die Seite $\overline{AB}$.

Die Gewinner der drei Blechschilder »Kamel« sind Dieter Hauffe, Frankfurt am Main; Karl Papenbrock, Minden; und Bernhard Marzetta, Riehen (Schweiz).

Lust auf noch mehr Rätsel? Unser Wissenschaftsportal wissenschaft-online (www.wissenschaft-online.de) bietet Ihnen unter dem Fachgebiet »Mathematik« jeden Monat eine neue mathematische Knobelei.

Der soziale Kern des Gähnens

Entgegen einer verbreiteten Meinung gähnen wir nicht wegen Sauerstoffmangels. Wir tun damit vielmehr Stimmungen kund

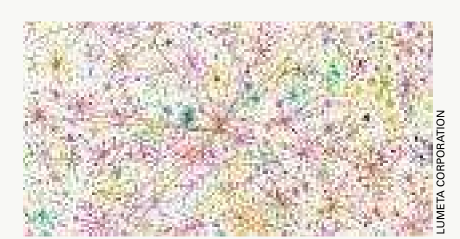
Aus urheberrechtlichen Gründen können wir Ihnen die Bilder leider nicht online zeigen.

FIREFLY PRODUCTIONS / CORBIS

WEITERE THEMEN IM JULI

Optimierter genetischer Code

Wie Computersimulationen ergaben, ist das Verschlüsselungssystem für Proteine im Erbgut so angelegt, dass Mutationen möglichst wenig Schaden anrichten



LUMETA CORPORATION

Skalenfreie Netze

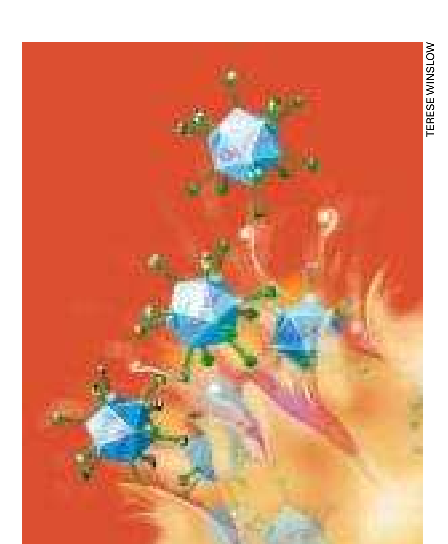
Ein Freundeskreis, das Internet und viele andere Beziehungsgeflechte folgen einem gemeinsamen Gesetz: Nur wenige sind reich und viele arm (an Beziehungen), wobei es auf die absolute Zahl der Netzmitglieder nicht ankommt

Aus urheberrechtlichen Gründen können wir Ihnen die Bilder leider nicht online zeigen.

BOB PARTRIDGE / THE ANCIENT EGYPT PICTURE LIBRARY

Königreich der Viehzüchter

Mal Konkurrent, mal Kolonie – das Schicksal des afrikanischen Königreichs Nubien war stets eng mit dem Ägyptens verknüpft



TERESE WINSLOW

Mit Viren gegen Krebs

Den Tumor zerstören, ohne gesunde Zellen zu schädigen: Die so genannte Virotherapie könnte diesen Traum der Medizin wahr machen